ResearchGate

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: https://www.researchgate.net/publication/322386423

أساسيات هندسة المواد

Book · January 2018

CITATIONS
0

READS
10,832

1 author:

Issa Baghni
Engineering Academy, Tajoura, Libya

11 PUBLICATIONS **70** CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:

Project Effect of coolant inhibitors on AZ91D View project

Project Principles of material engineering View project

All content following this page was uploaded by Issa Baghni on 15 January 2018.

The user has requested enhancement of the downloaded file.

أساسيات هندسة المواد

تأليف

د. عيسى مسعود بغني

منشورات إدارة الإعلام والنشر

أساسيات
هندسة المواد

الهيئة الليبية للبحث والعلوم والتكنولوجيا
إدارة الإعلام والنشر

أساسيات
هندسة المواد

تأليف
د. عيسى مسعود بغني

مراجعة لغوية

الطبعة الأولى 2014

رقم الإيداع /

دار الكتب الوطنية – بنغازي

جميع الحقوق محفوظة للناشر: الهيئة الليبية للبحث والعلوم والتكنولوجيا

الوكالة الليبية للترقيم الدولي الموحد للكتاب

دار الكتب الوطنية

بنغازي – ليبيا

هاتف:

بريد مصور:

بريد اليكتروني:

ردمك: ISBN

عرفان وتقدير

يسرني ويسعدني أن أعبر عن عميق العرفان والإمتنان والتقدير إلى كل من ساعد على إنجاز هذا العمل العلمي المتواضع، وأمل أن يكون لبنة في صرح نقل العلوم والتقنية إلى اللغة العربية.

أخص بامتناني لأفراد أسرتي اللذين لهم الصبر على إنشغالي وأصدقائي وزملائي اللذين لهم حسن المشورة والنصيحة.

فلهم جميعاً جزيل الشكر والتقدير

فهرس المحتويات

رقم	الموضوعات	الصفحة
	مقدمة	13
1	**الفصل الأول: تصنيف المواد الهندسية**	15
1.1	المواد المعدنية	15
2.1	المواد غير المعدنية	17
2	**الفصل الثاني: البنية الداخلية للمواد**	19
1.2	أنواع الروابط الدرية	19
2.2	تبلر المواد	22
3.2	بنية البلورات	23
4.2	حساب كثافة البلورات المكعبة	26
5.2	المواد الصلبة غير المتبلرة	29
6.2	المستويات البلورية	29
7.2	عيوب بنية المواد الصلبة	30
8.2	البنية الأيونية	34
3	**الفصل الثالث: مخططات أطوار الاتزان**	37
1.3	تعريف الطور	37
2.3	قاعدة الطور	37
3.3	مخططات الإتزان الثنائية	39
4.3	الوزن الجزئي	41
5.3	مخطط إتزان أطوار الحديد والكربون	44

4	**الفصل الرابع: الخواص الميكانيكية للمواد**	53
1.4	أنواع الإجهادات	53
2.4	العلاقة بين الإجهاد والإنفعال	58
3.4	المطولية	62
4.4	الصلابة	64
5.4	الصلادة	71
5	**الفصل الخامس: المعالجة الحرارية للصلب الكربوني**	79
1.5	تأثير معدل التبريد على البنية الداخلية للصلب الكربوني	79
2.5	طرق المعالجة الحرارية للصلب الكربوني	81
3.5	المعالجة الحرارية السطحية للصلب الكربوني	89
6	**الفصل السادس: سبائك المواد المعدنية**	99
1.6	السبائك الحديدية	99
1.1.6	حديد الزهر	99
2.1.6	الصلب الكربوني والصلب السبائكي	105
3.1.6	صلب العدد	109
4.1.6	الصلب المقاوم للصداء	111
2.6	السبائك غير الحديدية	118
1.2.6	سبائك الألومنيوم	118
2.2.6	سبائك الماغنيسيوم	131
3.2.6	سبائك النحاس	136
4.2.6	سبائك النيكل	141
5.2.6	سبائك التيتانيوم	144

7	**الفصل السابع: المواد البلاستيكية**	149
1.7	أنواع المواد البلاستيكية	149
1.1.7	اللدائن الحرارية	150
2.1.7	اللدائن المتصلبة بالحرارة	151
2.7	تفاعلات البلمرة	151
3.7	أنواع سلاسل البوليميرات	155
4.7	الخواص الفيزيائية للدائن الحرارية	157
5.7	تصنيع المواد البلاستيكية	162
6.7	أنواع اللدائن الحرارية	165
7.7	اللدائن المتصلبة بالحرارة	180
8.7	المطاط	186
8	**الفصل الثامن: المواد المركبة**	197
1.8	تصنيف المواد المركبة	198
2.8	أنظمة تسليح المواد المركبة	199
3.8	مواد التسليح	201
4.8	خواص مكونات المواد المركبة	204
5.8	الخواص الميكانيكية للمواد المركبة	207
6.8	تصنيع المواد المركبة	218
9	**الفصل التاسع: المواد الخزفية**	227
1.9	أنواع الخزفيات	228
2.9	البنية البلورية للمواد الخزفية	232
3.9	التركيب المجهري	233
4.9	عمليات التصنيع	235

5.9	المعالجة الحرارية	239
6.9	الخواص الميكانيكية للخزفيات	241
7.9	الخواص الفيزيائية	245
8.9	الخواص الكهربائية للخزفيات	246
9.9	الخواص الكيميائية	249
10.9	الخزفيات التقنية	249
10	**الفصل العاشر: المواد الكهربية والإليكترونية**	255
1.10	توصيلية المواد	256
2.10	الأساسيات الفيزيائية لتوصيلية المواد	259
3.10	تأثير الحرارة على التوصيلية الكهربية للمواد	262
4.10	المقاومة النوعية للسبائك	263
5.10	التوصيلية الحرارية للمواد	267
6.10	نظرية حزم الطاقة للمواد الصلبة	277
7.10	أشباه الموصلات	283
	المصادر والمراجع	295

مقدمة

رغم قدم وعراقة دراسة وتطبيقات علوم المواد، وتأثيره الكبير على شتى مناحي الحياة، إلا أنه كان تابعاً لعلوم أخرى ومهن صناعية مختلفة لقرون عديدة، ولم ينفصل كعلم قائم بذاته إلا حديثا في النصف الثاني من القرن العشرين، ويرجع ذلك إلى الكثير من الأسباب أهمها تنوع فروع هذا العلم وتشعبها، فلقد كانت تقتصر مواد التصنيع الأولية مع بدايات الحياة على المواد الطبيعية منها، مثل الخشب والحجر والفخاريات، لتطور إلى المواد المعدنية مثل النحاس والبرنز ثم الحديد وسبائكه، وأخيرا الألومنيوم، وفي المواد غير المعدنية كان الطوب والجبس، ثم الخرسانة غير المسلحة والمسلحة، والمواد البلاستيكية، وأخيرا المواد المركبة المسلحة بالألياف.

ولم يقتصر على هذا الحد بل تعداه إلى مواد أخري لها صفات وإستعمالات خاصة، مثل مواد التوصيل الفائق للكهرباء أو المغنطيسيات العالية، أو تحمل درجات الحرارة العالية، أو التوصيل الضوئي.

والجدير بالذكر أن تشعب فروع وتطبيقات علم المواد له رابط أساسي ينطلق من أن هذا العلم يقوم بإستنباط القوانين ووضع النظريات التي تفسر سلوك هذه المواد من أجل استخدامها أو تطويرها لتساهم في تقدم ورقي الحياة على ظهر هذه البسيطة.

وفي إطار فهم أساسيات هذا العلم كان هذا الكتاب الذي صمم أن يكون منهجاً دراسياً لطلبة السنوات الأولى من التعليم الجامعي، كما أنه لا غنى عنه للمهندس المتخصص في عمله وللفني في تطبيقاته العملية. فلقد عرضت محتويات

الكتاب بطريقة عملية ميسرة مع سرد الكثير من الأمثلة التي تساعد على فهم وإستيعاب المفاهيم الأساسية دون الغوص في الجدل النظري أو الرياضي للموضوعات.

إن هذا الكتاب يعتبر مدخلاً جيداً لعلوم وهندسة المواد، إذ يتناول خواص وإستعمالات الكثير من المواد الهندسية، مع إستثناء البعض منها مثل الخرسانة كمادة مركبة والخشب كمادة طبيعية، وهذه المواد كثيراً ما تتناولتها كتب سابقة ضمن موضوعات مواد البناء، كما لم يتم عرض المواد المغناطيسية بسبب حاجتها إلى خلفية نظرية ورياضية خارجة عن نطاق هذا الكتاب.

وفي النهاية نأمل من الله سبحانه وتعالى أن يجعل هذا العمل خالصاً لوجهه الكريم، وأن يجد فيه طلابنا ومهندسونا ضالتهم بما يساعدهم على إنجاز أعمالهم.

والسلام عليكم ورحمة الله وبركاته

الدكتور: عيسى مسعود بغني

20 مايو 2014

الفصل الأول

تصنيف المواد الهندسية

إن تطور العديد من أنظمة التقنية الحديثة، مثل محطات إنتاج الطاقة النووية والطائرات النفاثة السريعة ومراكب الفضاء، وكذلك أنظمة الحاسوب والاتصالات بأنواعها، أدى إلى الشعور بأهمية مواد التصنيع الأساسية كخيار أولي لأي تصنيع أو تطوير هندسي، بالإضافة إلى البحث عن مواد جديدة وبدائل للمواد المستعملة حاليا، فإن الاستفادة المثلى من المواد لا يتأتى إلا بفهم عميق لخواصها الميكانيكية والفيزيائية والكيميائية، وتركيباتها البلورية وتأثرها بالعوامل المحيطة.

1. مفاهيم تصنيف المواد:

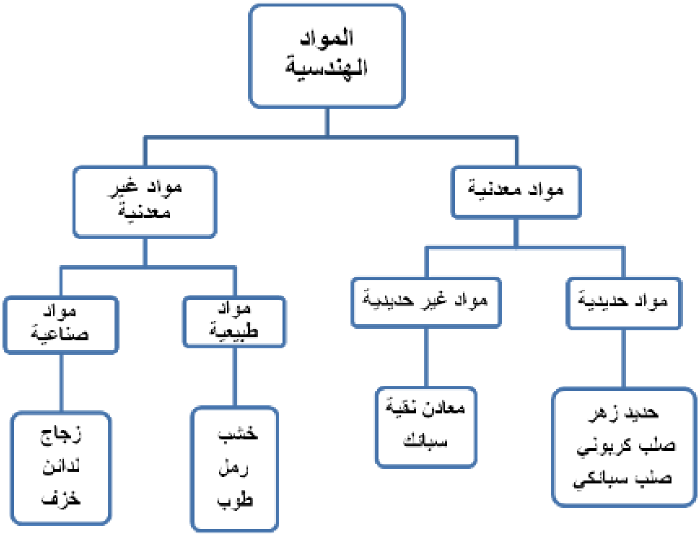
يوجد هناك عدة تقسيمات للمواد الهندسية أهمها تلك التي تعتمد على طبيعة المادة وخواصها ومن هذه، تقسيم المواد إلى مواد معدنية وغير معدنية مع وجود تفريعات كثيرة لكل منهما كما بالشكل (1-1).

1-1 المواد المعدنية:

تتكون المواد المعدنية أساسا من عناصر المعادن والتي تتجاوز 80 عنصراً في حين أن المستعمل منها في النواحي الهندسية لا يتجاوز 20 عنصراً، ومن أهم هذه العناصر الحديد والنحاس والالومنيوم والكروم والنيكل وغيرها.

وهذه المعادن قد تستخدم نقية، وفي معظم الأحيان تضاف إلى بعضها البعض بنسب معينة لتكوين السبائك، وذلك أن الخواص الميكانيكية للسبائك أفضل

من خواص المعادن النقية، كما أن العناصر غير المعدنية مثل الكربون والنيتروجين والأكسجين تضاف كذلك لتحسين خواص الكثير من السبائك وخاصة الحديدية منها .



شكل (1 - 1) نظام تصنيف المواد الهندسية.

وتعتبر المواد المعدنية مواد موصلة للحرارة والكهرباء بدرجات متفاوتة وذات بنية بلورية ولها خواص ميكانيكية جيدة مثل قوة الشد العالية والمطيلية المناسبة للتشكيل على البارد والساخن، بل أن البعض منها له خواص جيدة عند درجات الحرارة العالية.

وتتفرع المواد المعدنية إلى فرعين رئيسيين وهما المواد الحديدية والمواد غير الحديدية، حيث تمثل المواد الحديدية ما نسبته 90% من الإنتاج العالمي من المواد المعدنية وذلك بسبب خواصها الميكانيكية المناسبة لمعظم التطبيقات الهندسية من ناحية وإنخفاض تكاليف إنتاجها وتصنيعها من ناحية أخرى.

أما المعادن غير الحديدية فلها خواص فيزيائية مهمة مثل التوصيل الكهربي والحراري الجيد الذي يتمثل في النحاس والالومنيوم والفضة أو خفة الوزن كالماغنيسيوم والالومنيوم والتيتانيوم أو مقاومة التآكل كالالومنيوم والكروم أو مقاومة التأكسد عند درجات الحرارة العالية كما في سبائك النيكل وهكذا فإن المعادن وسبائكها تتنوع في خواصها وتطبيقاتها.

2-1 المواد غير المعدنية:

تحتوي المواد غير المعدنية على عدة أنواع متباينة من ناحية الخواص ومن ناحية الاستعمال، فالخشب خفيف الوزن وذو مرونة العالية قد ثم استخدامه في الكثير من المجالات لقرون عديدة وهو من المواد غير المعدنية الطبيعية، ومثله الطوب والرمل. ومن هذه المجموعة ما هو غير معدني صناعي مثل المواد البلاستيكية والخزفية والزجاج والمواد المركبة.

ا- المواد البلاستيكية:

تتكون المواد البلاستيكية من سلاسل هيدروكربونية مرتبطة مع بعضها البعض بروابط تساهمية، وهي في معظمها مواد غير متبلرة ولها خواص ميكانيكية اقل جودة من المواد المعدنية خاصة عند إرتفاع درجات الحرارة عن 150 دم، إلا أنها لها خواص أخرى على درجة كبيرة من الأهمية مثل العزل الحراري والكهربي وخفة الوزن ومقاومة التآكل وسهولة التصنيع بالإضافة إلى إنتاج أحجام مختلفة وأشكال معقدة ذات تشطيب نهائي في خطوة واحدة.

ب- المواد الخزفية:

يوجد بالمواد الخزفية عناصر معدنية ومركبات تحتوي على عناصر غير معدنية مترابطة مع بعضها البعض بروابط أيونية وتساهمية، وقد تكون مواد متبلرة أو غير متبلرة أو مزيج منهما. وتمتاز المواد الخزفية بصلادتها الكبيرة ومقاومتها العالية للحرارة، ولا يحد من إستخدامها سوى قابليتها للكسر، فمعظم المواد الخزفية مواد هشة لا تتحمل الصدمات الفجائية.

ولقد ثم أخيراً تطوير بعض الأنواع من الخزفيات التي تتصف بصلابة أفضل من الخزفيات التقليدية، ومن الصفات الأساسية المتميزة للخزفيات عزلها الحراري والكهربي مما جعلها مناسبة للعديد من التطبيقات الهندسية المتطورة مثل سفن الفضاء وصناعة الأفران والعوازل الكهربية والمكثفات والمجسات وغيرها.

ج- المواد المركبة:

يتلخص مفهوم المواد المركبة في وجود أكثر من مادة في وسط واحد ويكون الترابط بينها فيزيائيا. وتحتوي المواد المركبة على مادة تكون مالئة أو مانحة للقوة مثل الألياف الزجاجية والألياف الكربونية وكذلك مساحيق العديد من العناصر والمركبات، ومادة أخرى رابطة مثل بوليميرات الايبوكسي و بولي إستر، ويمكن تصنيع نوعيات مختلفة من هذه المواد بإستخدام تراتيب مختلفة لطبقات الألياف.

والجدير بالذكر أن المواد المركبة لها قوة شد تتجاوز قوة معظم المعادن أو السبائك المستخدمة حاليا، هذا بالإضافة إلى خفة الوزن التي تضاهي سبائك الالومنيوم، مع مقاومة جيدة للظروف الجوية، الأمر الذي يجعل المواد المركبة مناسبة لصناعة الهياكل المعدنية المستخدمة في السيارات والعربات والقوارب والسفن والطائرات وكذلك الأنابيب الناقلة للمياه والمقاومة للظروف الجوية في مجال النفط وغيرها من التطبيقات الهندسية المختلفة.

الفصل الثاني

البنية الداخلية للمواد

تتركب جميع المواد مهما اختلفت مصادرها أو مكوناتها من ذرات لها أوزان ذرية متباينة في الكتلة، وهذه الذرات ترتبط مع بعضها البعض بروابط وقد تتكتل في مجموعات بلورية أو مواد غير متبلرة مما يجعل كل نوع منها ذات خواص فيزيائية وميكانيكية محددة.

1-2 أنواع الروابط الذرية:

تنقسم روابط الذرات إلى نوعين إحداهما الروابط القوية، وهذه الروابط على درجة كبيرة من الأهمية بسبب تواجدها في معظم المواد الصلبة في حين أن الروابط الضعيفة توجد معظمها في السوائل و الغازات.

روابط قوية : الرابطة الأيونية ، التساهمية ، المعدنية .

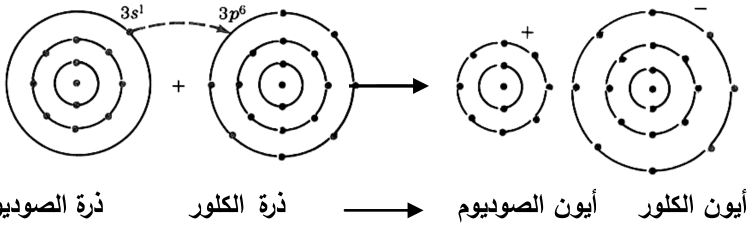
روابط ضعيفة :رابطة فاندرفالس، ورابطة الهيدروجين .

1- الرابطة الأيونية:

هي الرابطة التي تحدث بين العناصر ذات الايونات الموجبة القوية (المعادن) والعناصر السالبة (غير معدنية) وبذلك تكون الرابطة عبارة عن تجاذب بين الايونات الموجبة والسالبة كما بالشكل (2-1). ومن أمثلة هذه المركبات NaCl, CaCl, Al_2O_3

خواص الرابطة الأيونية:

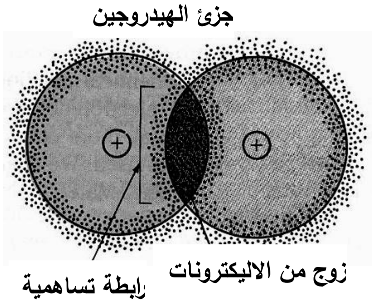
مركبات الرابطة الأيونية معظمها أملاح لا لون لها هشة (Brittle) لها توصيلية كهربية منخفضة، ودرجة إنصهار عالية.



شكل(2-1) الرابطة الأيونية لملح كلوريد الصوديوم.

2- الرابطة التساهمية :

تساهم الذرة بالكتروناتها في المدار الأخير مع ذرات أخرى لتكوين رابطة تساهمية ويتطلب ذلك أن أحد الذرات يكون لها أربعة اليكترونات أو أكثر والأخرى لها أربعة إليكترونات أو أقل في مدارهما الأخير كما بالشكل(2-2). وتعتبر الرابطة التساهمية أساسية في مشاركة ذرات المواد العضوية والبلاستيكية والمواد المركبة.



شكل(2-2) الرابطة التساهمية بين ذرتي هيدروجين.

ويمكن أن تكون الروابط التساهمية بين ذرات العناصر من نوع واحد أو بين عناصر مختلفة كما يأتي:

أ- روابط تساهمية للعناصر النقية:

المجموعة الرابعة من الجدول الدوري: عناصر ترتبط بروابط ثنائية (O, S, Se)

المجموعة الثالثة من الجدول الدوري: عناصر ترتبط بثلاثة روابط (N,P, As)

المجموعة السادسة من الجدول الدوري: عناصر لها أربعة روابط (C, Si, Ge, Pb).

ب- روابط تساهمية للمركبات:

روابط المركبات العضوية: وتكون بين الكربون والعناصر الأخرى مثل الأكسجين والنيتروجين والكبريت وغيرها -O=C ، N=C

روابط المجموعة الثالثة والخامسة مثل مركب زرنيخات الجاليوم Ga As

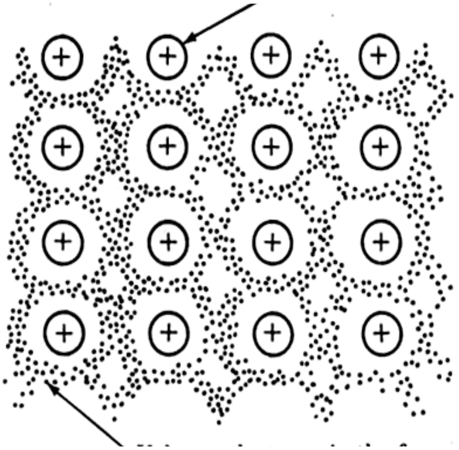
روابط المجموعة الثانية والسادسة مثل مركب كبريتيت الخارصين Zn S

3- الرابطة المعدنية:

تحدث الرابطة المعدنية بين المعادن التي يوجد في مدارها الأخير عدد قليل من الاليكترونات غير ملائمة لتكوين روابط تساهمية وعدم وجود ايونات مختلفة في الشحنة لتكوين روابط أيونية.

هذه الوضعية تؤدي إلى أن كل ذرة تشارك باليكترونات التكافؤ لتكوين سحابة من الاليكترونات السالبة تكون في حالة إتزان كهربي مع النواة الموجبة، وهذه الاليكترونات ليست تابعة لذرة معينة ولكنها حرة الحركة، وبذلك يمكن توضيح إنتقال أو توصيل الكهرباء في المعادن عن طريق الاليكترونات الحرة القابلة للحركة عند التأثير عليها بجهد خارجي كما هو مبين في الشكل(2-3).

ويمثل الرابطة المعدنية بجلاء المعادن الموصلة للكهرباء والحرارة مثل النحاس والالومنيوم والفضة وكذلك المعادن الأخرى الأقل توصيلا مثل الحديد والنيكل.



شكل (2- 3) الرابطة المعدنية.

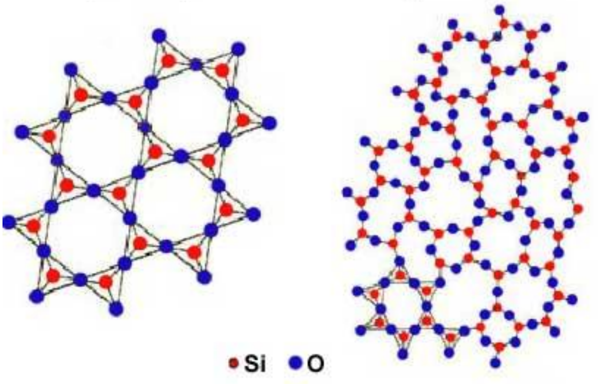
4- رابطة فاندرفالس :هي عبارة عن روابط ضعيفة تتكون بين الذرات الموجودة في المركبات، وذلك لوجود قطبين في المركب أحداهما موجب والآخر سالب، ويرجع ذلك إلى اختلاف حجمي الذرات في المركب.

2-2 تبلر المواد:

إن جميع المواد الصلبة يمكن تقسيمها إلى مواد بلورية وأخرى غير متبلرة كما بالشكل(2-4). وتمتاز المواد المتبلرة بوجود ترتيب معين لمكان الذرات على نطاق واسع، وبذلك نرى أن الوحدة البلورية تتكرر على جميع أبعاد المادة، على العكس من ذلك فإن المواد غير المتبلرة، لا يوجد لذراتها ترتيب معين على نطاق واسع، ولا يوجد نسق محدد لتوزيع الذرات.

أكسيد السليكون غير متبلر (زجاج)

أكسيد السليكون متبلر بلورة (الكوارتز)



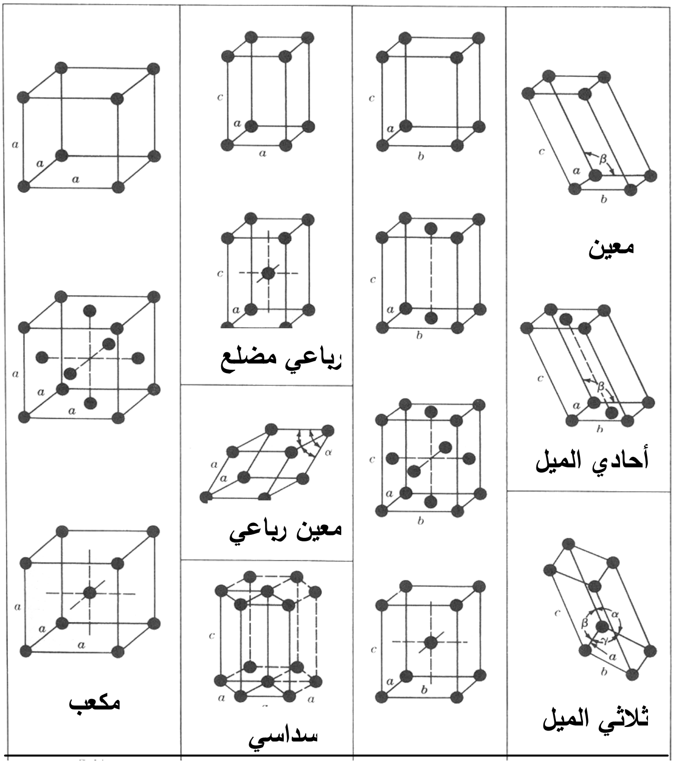
شكل (2-4) ترتيب الذرات في المواد المتبلرة والمواد غير المتبلرة.

والجدير بالذكر أنه يوجد هناك أربعة عشرة نوعا من البلورات في الطبيعة تقع الذرات على جميع زواياها، والبعض منها على الأسطح الخارجية أو داخل البلورة، وهذه البلورات منها ما هو مكعب أو سداسي أو معين، ومنها ما هو مائل كما بالشكل(2-5).

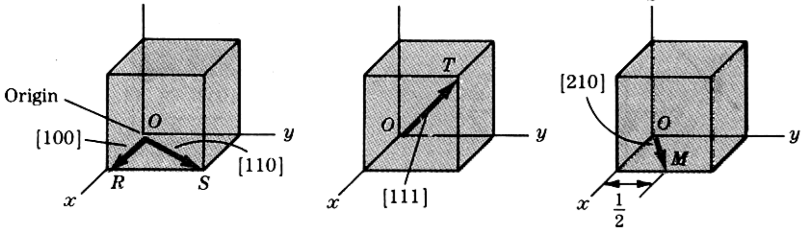
2- 3 بنية البلورات:

يتم وصف وضع الذرة في البلورة عن طريق تمثيل أحد ذرات زوايا البلورة كنقطة المركز لمحاور ثلاثية الأبعاد، وبذلك يمكن تحديد موضع جميع الذرات الأخرى بالنسبة للمركز كما هو مبين بالشكل(2-6).

كما أن ذرات البلورات في مستوى معين تترتب بحيث تشغل أقل حيز ممكن، وعند تركيب مستويات الذرات فوق بعضها، فيمكن لها أن تكون على شكل بلورات مكعبة سطحية الذرات أو وسطية أو بلورات سداسية، وذلك تبعا لترتيب المستويات.



شكل (2 - 5) أنواع البلورات التي تعبر عن البنية الداخلية للمواد.



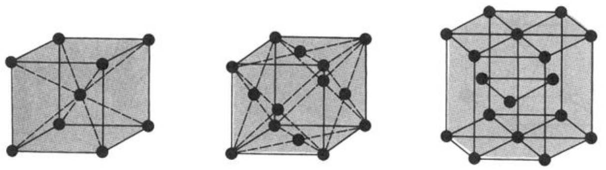
الشكل(2-6) تحديد إحداثيات الذرات في البلورة المكعبة.

ومن الملاحظ أن معظم المعادن الصناعية المهمة تندرج تحت إحدى ثلاثة طرق رئيسية للتبلر وهي:

1- بلورات مكعبة وسطية الذرة Body centered cubic (BCC)

2- بلورات مكعبة سطحية الذرة Face centered cubic (FCC)

3- بلورات سداسية Close packed hexagonal (CPH)



شكل(2-7) ترتيب الذرات في البلورات السداسية والمكعبة السطحية والمكعبة الوسطية.

من الشكل (2-7) يمكن تصور أن كل ذرة من ذرات الزوايا في البلورة المكعبة، تشترك مع ثمانية ذرات مجاورة، في حين أن ذرات البلورات السداسية تشترك مع إثنى عشرة ذرة من البلورات المجاورة. والجدول (2-2) يوضح البنية البلورية لأهم المعادن الصناعية.

جدول (2-1) البنية البلورية لبعض المعادن الصناعية.

نوع البنية	المعادن
BCC	Cr, Fe(α), Mo, V, K, Na, W,
FCC	Al, Cu, Ag, Au, pt, Pb, Ni,
CPH	Mg, Zn, Cd, Be, Ti,

2- 4 حساب كثافة البلورات المكعبة:

تعتمد كثافة البلورات على عدد الذرات في البلورة عندما يكون حجم المكعب ثابت، ويمكن حساب عدد الذرات في البلورة من المعادلة الآتية:

$$N = N_c / 8 + N_l + N_f /2 \qquad (1-2)$$

حيث أن:

N عدد الذرات في البلورة.

N_c عدد ذرات الزوايا.

N_l عدد الذرات الداخلية.

N_f عدد الذرات السطحية.

مثال (1)

أوجد عدد الذرات الموجودة في كل من البلورة الوسطية والبلورة السطحية.

أ- البلورة الوسطية (BCC):

$$N= Nc /8 + N_l + N_f /2 =2$$

عدد الذرات = 2

ب- البلورة السطحية (FCC):

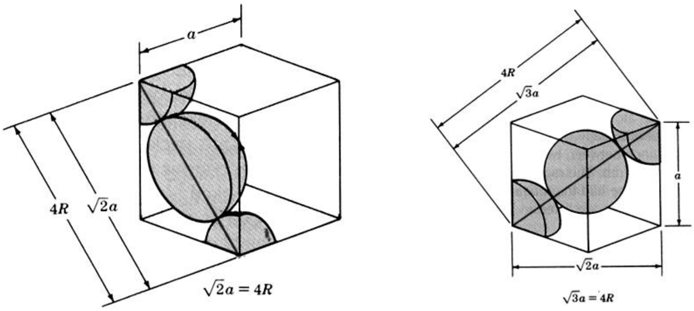
$$N= N_c /8 + N_l + N_f /2 =4$$

عدد الذرات = 4

وهذا يوضح أن البلورة السطحية أكبر كثافة من البلورة الوسطية.

مثال: (2)

أوجد نسبة التغيير المئوية في حجم البلورة من نوع المكعبة السطحية (FCC) إذا تم تحويلها إلى مكعبة وسطية (BCC) على إفتراض أن الذرات كروية الشكل ولها قطر ثابت لكلا النوعين من البلورات .



بلورة مكعبة سطحية **بلورة مكعبة وسطية**

شكل (2-8) أبعاد الأقطار في البلورة المكعبة الوسطية والسطحية .

الحل:

بفرض أن طول نصف قطر الذرة يساوى r وطول ضلع المكعب a كما بالشكل(2-8) يتم معرفة الأبعاد الأخرى بحساب المثلثات كما يأتي:

1- البلورة المكعبة الوسطية : تكون الذرات مترابطة ومتراصة في قطر المكعب وبذلك يكون طول ضلع المكعب:

$$2a^2 + a^2 = (4r)^2$$

$$3a^2 = (4r)^2$$

$$a = \frac{4r}{\sqrt{3}}$$

2- البلورة المكعبة السطحية :

$$a^2 + a^2 = (4r)^2$$

$$2a^2 = (4r)^2$$

$$a = \frac{4r}{\sqrt{2}}$$

بذلك يكون الحجم المتعلق بكل ذرة في البلورة = <u>حجم البلورة</u>
عدد الذرات في البلورة

الحجم المتعلق بكل ذرة في البلورة المكعبة السطحية (V_{fcc})

$$V_{fcc} = \frac{(4r/\sqrt{2})^3}{4} \qquad (2-2)$$

والحجم المتعلق بكل ذرة في البلورة المكعبة الوسطية (V_{Bcc})

$$V_{Bcc} = \frac{(4r/\sqrt{3})^3}{2} \qquad (3-2)$$

كما أن نسبة التغيير في الحجم عند تحويل البلورة السطحية إلى وسطية = الفرق بين الحجمين على حجم البلورة الوسطية.

$$\% = \frac{V_{Bcc} - V_{Fcc}}{V_{Bcc}} \qquad (4-2)$$

وبتعويض قيم المعادلتين(2−1) و (2−2) في المعادلة (2−3) تتحصل على نسبة التغيير وتساوي 8.8 %

2- 5 المواد الصلبة غير المتبلرة:

عند تصنيع بعض المواد الصلبة يتعذر تكوين البلورات لإحدى السببين :

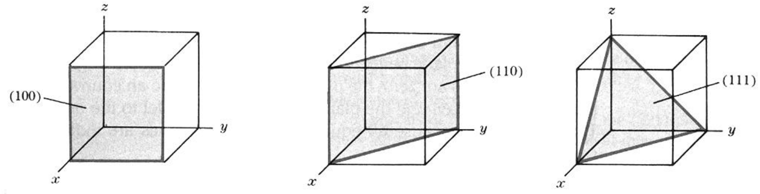
أ− نتيجة لوجود جزيئات معقدة في المادة، الأمر الذي لا يسمح لها بترتيب نفسها في بلورات منتظمة، وهذا ما يحدث في الكثير من المواد البلاستيكية وبعض الخزفيات.

ب− عندما يبرد المصهور بسرعة فإن الذرات والجزئيات لن يكون لها وقت مناسب لترتيب تواجدها على شكل بلورات منتظمة وهذه الحالة شائعة في بعض المعادن وأكاسيدها.

2- 6 المستويات البلورية:

كما ذكرنا سابقا يتم تحديد أبعاد وتواجد الذرات في البلورة من تمثيلها بإحداثيات ذات ثلاثة أبعاد، وبالمثل تحدد المستويات البلورية بالنسبة للإحداثيات الثلاثة. ولقد قام العالم ميللر بوضع دليلا يسمى باسمه (Miller indices) يوضح فيه وضعية المستويات المختلفة في البلورة وتحديد أماكنها بإستعمال الإحداثيات الثلاثة كما بالشكل(2-9).ويتم إيجاد قيم دليل ميللر للمستويات البلورية على خطوتين؛ أولاهما تحديد إحداثيات المستوي في ثلاثة أبعاد، ثم إيجاد معكوس القيمة، فمثلا المستوي في

الشكل(2- 9a) له إحداثيات (∞ ، ∞ ، 1) ويتم إيجاد المعكوس بتقسيم الواحد الصحيح على كل قيمة منها (1/∞ ، 1/∞ ، 1/1) وهكذا تكون قيم دليل مللر تساوي (0 ،0 ، 1).



شكل(2-9) دليل ميللر لبعض المستويات في البلورات المكعبة.

2- 7 عيوب بنية المواد الصلبة:

عند تسخين معدنين مثل النحاس والخارصين أو معدن وعنصر غير معدني مثل الحديد والكربون فان ذراتهما تتداخل بعدة طرق لتكوين سبائك، وقد ينظر إلى الذرات المضافة كعيوب موضعية أو شوائب في البلورة النقية إلا أنها من الناحية التقنية تعتبر وسيلة فعالة للحصول على العديد من السبائك ذات أهمية صناعية كبيرة. ومن هذا المنطلق فان المواد المتبلرة الصلبة تحتوي على العديد من العيوب نوردها فيما يأتي:

1– عيوب موضعية (Point Defects):

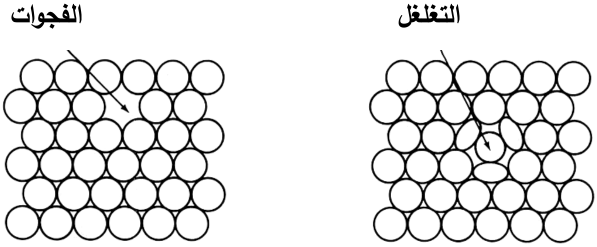
تحدث العيوب الموضعية في أماكن محددة في مستوى الذرات المتبلرة ويكون ذلك نتيجة لتغلغل ذرة خارجية أو ذرة من نفس النوع بين الذرات أو وجود فجوات ذرية في المستوى (Vacancy). وفى حالة المواد المتبلرة الصلبة النقية فان العيوب الموضعية تكون نتيجة لوجود شوائب من ذرات أخرى أو وجود فجوات ذرية أو وجود ذرات في غير مواضيعها كما بالشكل(2-10) .

أ- **الفجوات أو الثغرات (Vacancies):**

الفجوات عبارة عن وجود فراغات ناتجة عن فقدان ذرة أو أكثر من بين الذرات في المستوى البلوري، وتحدث هذه الفجوات بسبب التبريد السريع لمصهور المعدن أو إعادة التبلر أو الإجهادات الناتجة عن التشكيل.

ب- **التغلغل (Interstitial):**

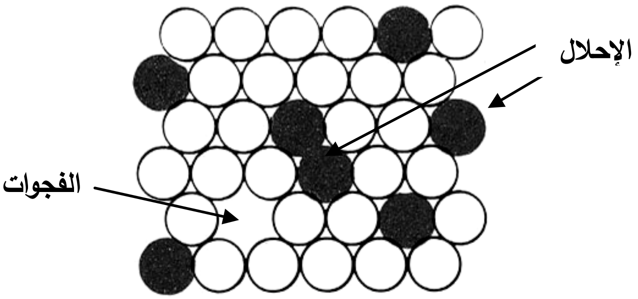
التغلغل عبارة عن وجود ذرة إضافية من نفس نوع ذرات البلورة أو من نوع آخر بين الذرات، وكلما كان حجم الذرات المضافة صغيراً، كلما كان التغلغل أسرع وأسهل.



شكل (2 - 10) الفجوات والتغلغل كعيوب موضعية للبلورات.

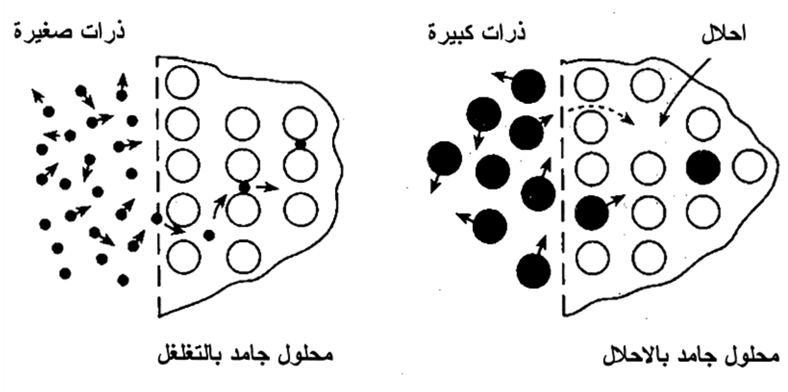
ج- **الإحلال (Substitution):**

هو إحلال ذرة شائبة بإحدى ذرات مستوى البلورة كما بالشكل(2 - 11). ويعتمد التغلغل والإحلال على حجم الذرة الشائبة بالنسبة لحجم المكان، فان الذرات الصغيرة الحجم يمكن لها أن تتغلغل بين ذرات البلورة، كما أن الذرات الكبيرة عادة ما تدخل البلورة بالإحلال.



شكل (2 - 11) الإحلال والفجوات كعيوب موضعية للبلورات.

وعندما تدخل ذرات مواد أخرى إلى البلورات عن طريق التغلغل أو الإحلال فانه يتكون طور جديد يعرف بالمحلول الجامدٍ (Solid solution) كما بالشكل(2-12).



شكل(2 -12) تكوين السبائك بالإحلال وبالتغلغل.

ويحدث المحلول الجامد بالإحلال بين المعادن أو المركبات في السبائك الآتية:

Si-Ge, Au- Ni, Cu-Ni, Al2 O3 - Cu2 O3, MgO – FeO

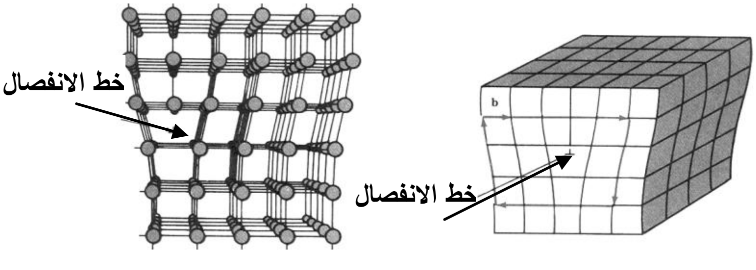
كما أن المحلول الجامد يحدث بتغلغل العناصر التي لها أوزان ذرية صغيرة مثل الهيدروجين والنيتروجين والكربون والبورون وبين ذرات بعض المعادن الصناعية مثل الحديد، ويعمل التغلغل على زيادة الصلادة للمعدن، ومن السبائك التي يمكن الحصول عليها بالتغلغل ما يأتي: Fe-C, Fe-H, Ni-C, Fe-N .

2- العيوب المحورية:

تتركز العيوب المحورية في وجود الانفصالات (Dislocations). والانفصال عبارة عن التواء لذرات البلورات حول محور واحد. ويحدث ذلك لعدة أسباب منها التصلب السريع للمصهور المتبلر لبعض السبائك أو عند التشكيل على البارد وكذلك بسبب عدم تجانس ذرات السبيكة.

أ - الانفصال بحافة أو الطرفي:

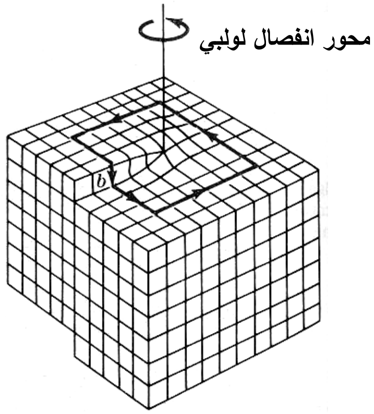
ويؤثر هذا الانفصال في صف الذرات التي حدث بها وتكون الصفوف الأخرى سليمة كما بالشكل(2-13).



شكل (2 - 13) الانفصال بحافة كعيب محوري للبلورات.

ب – الانفصال اللولبي:

يمتد الانفصال اللولبي لمسافات طويلة داخل المعدن وذلك بسبب إعادة ترتيب البلورات بداخل المعدن على شكل لولبي كما بالشكل(2-14).



شكل (2 - 14) الانفصال اللولبي.

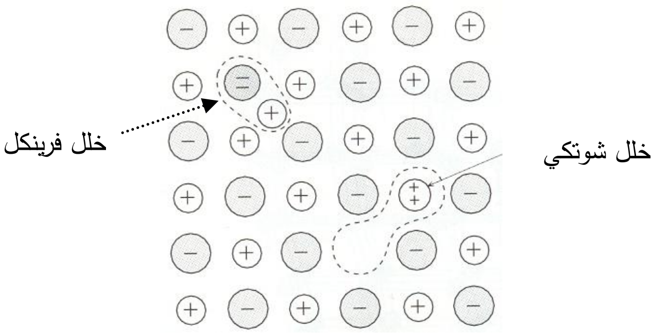
ولقد أقيمت عدة نظريات لتفسير دور الانفصال في بداية الانهيارات المعدنية وتأثيره في الخواص الميكانيكية وكذلك تأثير مواد السبك علي الانفصال وعلي الخواص الميكانيكية.

2- 8 البنية الأيونية:

1− **العيوب الموضعية للبنية الأيونية :**

بسبب الاتزان الاليكتروني في البلورات فان أي فجوة اليكترونية (أي نقص في إحدى الاليكترونات) ينتج عنها نقص في الايونات المعاكسة في الشحنة أو تغلغل للاليكترونات من نفس نوعية الاليكترونات الأصلية، كما أن الفجوات الاليكترونية قد

تحدث لأكثر من شحنة واحدة ويعبر عنها بعيوب شوتكي (Schottky imperfection) كما بالشكل(2-15). بالمقابل فإن خلل فرينكل يحدث عند إنتقال أحد الأيونات من موقعه في حالة الاتزان الأيوني إلى موقع بين الذرات فيؤدي إلى تكوين شحنتين معاكستين في الشحنة في المنطقة القريبة للمحافظة على الاتزان الكهربي للنسق البلوري كما بالشكل(2-15).



شكل (2 - 15) عيوب شوتكي الإليكترونية للمواد.

أسئلة الفصل الثاني

1. بين بالرسم توزيع الإليكترونات في الرابطة الأيونية والرابطة التساهمية.
2. وضح لماذا تتصف المعادن بالتوصيل الكهربي وتمتاز المواد العضوية والبلاستيكية بالعزل الحراري والكهربي.
3. وضح بالرسم توزيع الإليكترونات في الرابط المعدنية.
4. أذكر أمثلة لعناصر المجموعة الرابعة والخامسة التي ترتبط فيما بينها أو مع غيرها بروابط تساهمية.
5. وضح الفرق بين البنية الداخلية للمواد المتبلرة والمواد غير المتبلرة.
6. بين بالرسم وضع الذرات في البلورة المكعبة السطحية والوسطية.
7. بين بالرسم وضع الذرات في البلورة السداسية.
8. بين نوع البلورات في المعادن الآتية:

النحاس، الماغنيسيوم، الألومنيوم، الكروم، التيتانيوم، الرصاص، الحديد (فيريت)

9. أوجد عدد الذرات في البلورة المكعبة الوسطية والسطحية الذرة؟ وبفرض تساوي الحجم لكلا البلورتين، بين كثافة كل منهما.
10. أذكر خطوات إيجاد دليل ميلر للمكعبات في الشكل(2 - 9).
11. ما أسباب تعذر تكوين البلورات عند تصنيع بعض المواد المعدنية وغير المعدنية.
12. وضح بالرسم عيوب البلورات الموضعية.
13. وضح بالرسم عيوب البلورات المحورية.
14. أذكر مع التوضيح بالرسم العيوب الأيونية للبلورات.
15. متى تتكون السبائك بالإحلال بين الذات ومتى تتكون بالتغلغل.

الفصل الثالث

مخططات أطوار الإتزان

تهدف مخططات أطوار الإتزان (Equilibrium phase diagrams) للمعادن والسبائك إلى فهم سلوك تركيزات المعادن في السبيكة الواحدة من حيث تكوين مركبات كيميائية أو مخاليط فيزيائية بسبب التشبع أو عدم القدرة على التفاعل وذلك عند رفع حرارة السبيكة إلى درجة الإنصهار أو قريبة منها وكذلك عند خفض الحرارة بمعدلات تبريد مختلفة، وما يترتب عن ذلك من تغير في الخواص الميكانيكية.

3- 1 تعريف الطور (phase):

الطور عبارة عن مادة متجانسة لها خواص فيزيائية وميكانيكية محددة وتركيب كيميائي معروف. فالمواد النقية تكون ذات طور واحد عند درجة حرارة وضغط معين، في حين أن السبائك والمخاليط كثيرًا ما تحتوي على عدة أطوار.

وكمثال على أطوار المواد النقية ذوبان الثلج وتحوله من الطور الصلب إلى الطور السائل وكذلك تبخر الماء وتحوله إلى الطور الغازي وهذا التحول من طور إلى أخر يعتمد على درجة الحرارة والضغط كما بالشكل (3- 1).

2-3 قاعدة الطور (Phase rule):

أوضح العالم (Gibbs) أن هناك ثلاثة متغيرات تؤثر في مخططات أطوار الإتزان وهي درجة الحرارة والضغط وعدد المكونات، وهذه المتغيرات هي التي تحدد

سلوك السبائك وتكوين الأطوار، ويتم التعبير عن ذلك بقاعدة الطور كما بالمعادلة (1−3).

$$P + F = C + 2 \qquad (1-3)$$

حيث أن:

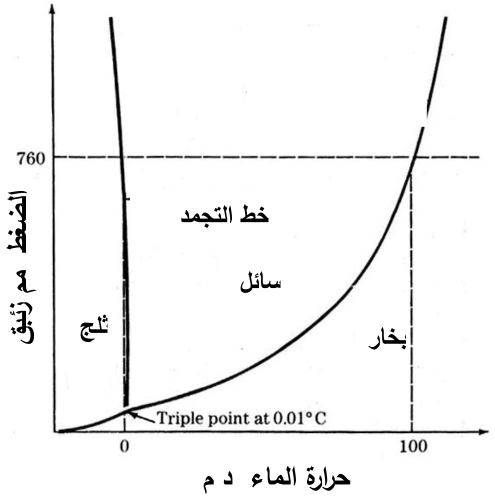
F: درجة الحرية (degree of freedom).

P: عدد الأطوار.

C: عدد المكونات التي قد تكون عناصر أو مركبات.

فمثلا عند وجود مكون واحد كما في حالة الماء وبطور واحد (البخار أو الثلج أو الماء) تكون درجة الحرية 2 أي درجة الحرارة والضغط كما بمخطط إتزان الماء في الشكل(3-1).

$$\mathbf{F = C + 2 - P = 1 + 2 - 1 =} 2$$



الشكل (3-1) منحنى إتزان أطوار الماء النقي.

إن وجود أكثر من طور مع تغير درجة الحرارة والضغط يتطلب رسم المخطط في ثلاثة أبعاد وهو أكثر تعقيدًا. وبما أن المواد المتعددة المكونات من السبائك عادة ما تتعرض لضغط ثابت يساوي 1 ضغط جوي فإن قاعدة الطور يمكن كتابتها علي الوجه التالي:

$$P+F = C+1 \qquad (2-3)$$

3- 3 مخططات الإتزان الثنائية (Binary phase diagram):

عند وجود عنصرين أو مركبين تامي الإمتزاج في الحالتين الصلبة والسائلة عند ضغط الهواء الجوي، فإن درجة الحرية يمكن حسابها من المعادلة (3−2) أي أن:

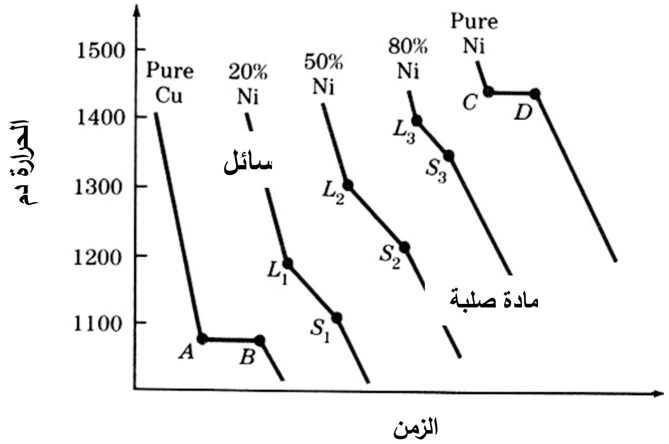
$$F = C + 1 - P = 2 + 1 - 2 = 1$$

وبذلك فإن درجة الحرية تساوي الواحد الصحيح، وهو التغيير في درجة الحرارة أو المكونات، وهذه الحالة تمثل الكثير من السبائك الصناعية المحتوية على عنصرين مثل سبائك النحاس والنيكل وسبائك النحاس والخارصين والسليكون والجرمانيوم وغيرها.

3-3- 1 مخطط الطور للنحاس والنيكل:

يمكن رسم مخطط إتزان عنصرين في سبيكة عن طريق تحضير عدد من العينات (في هذه الحالة خمسة عينات كما بالشكل (3- 2)) بنسب مكملة لبعضها البعض، أي عندما يكون هناك 20% نيكل يكون النحاس بنسبة 80% وهكذا، ثم تسخن العينات إلى درجة حرارة الانصهار بالكامل ويلي ذلك تبريدها تدريجيا واحدة تلو الأخرى، ويتم متابعة تغير درجات الحرارة مع الزمن، وذلك انه عند درجة حرارة معينة

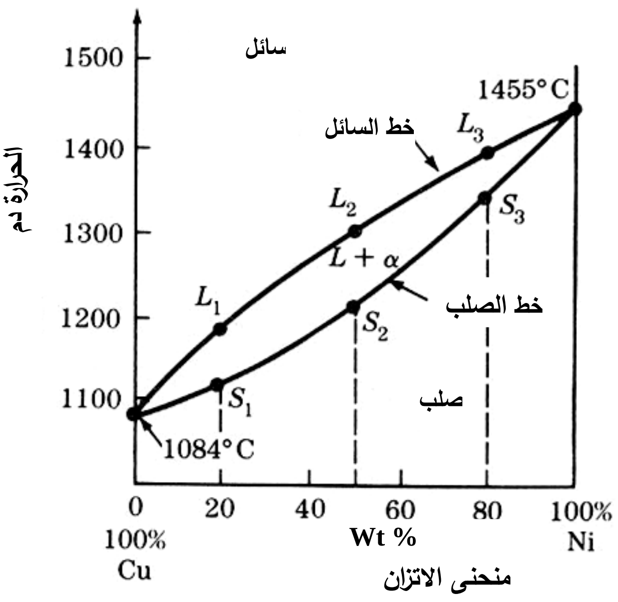
لكل عينة يحدث ثبات للحرارة مع الزمن وهذا يعطي نقطتين وهما نقطة بداية التحول من الحالة السائلة إلى مزيج من السائل والصلب والأخرى نقطة التصلب الكامل للمصهور كما بالشكل (3- 2). وهذا المنحنى يعرف بمنحنى التحول لدرجة الحرارة مع الزمن (Time Temperature Transformation) أو (TTT).



شكل (3 – 2) العلاقة بين درجة الحرارة والزمن.

وعند توصيل نقاط التحول للمصهور (L) وكذلك نقاط التصلب (S) فإننا نحصل على مخطط الطور للنحاس والنيكل كما بالشكل (3-2).

وبذلك يمكن الحصول على علاقة بين درجة الحرارة لمصهور المعدنين ونسبة كل معدن في السبيكة في الطورين السائل والصلب، ومنها يمكن حساب أوزان كل عنصر في السبيكة بدلالة درجة الحرارة.



شكل (3 - 3) منحنى إتزان أطوار النحاس والنيكل.

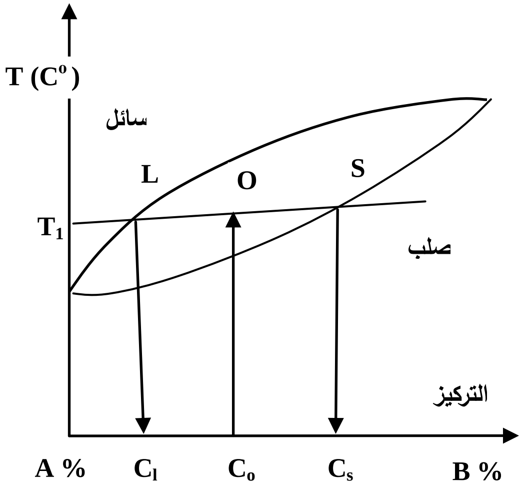
3- 4 الوزن الجزئي (Weight fraction):

لأي سبيكة تتكون من طورين في حالة إتزان كما بالشكل (3-2) يمكن حساب الوزن الجزئي السائل والصلب حسب قاعدة ليفر (Lever rule) أو رياضيا.

فعند وجود تركيز معين للسبيكة قدره (C_o) عند درجة حرارة (T_1)، يتقاطع الخط الأفقي للحرارة مع الخط الصلب والخط السائل للمنحنى، وبذلك يمكن الحصول على نسبة الصلب ونسبة السائل في العينة عند درجة الحرارة المحددة، كما بالشكل(3-3).

أ- حساب الوزن الجزئي بقاعدة ليفر:

يمكن حساب الوزن الجزئي الذي يعبر عن نسبة المصهور السائل أو المادة الصلبة عن طريق الرسم، وذلك بتوصيل النقاط الأفقية (S,O,L,T_1) وتحديد تقاطعاتها ثم التعويض في معادلات الوزن الجزئي:



شكل(3-4) مخطط إتزان تنائي الأطوار.

$$F_l = \frac{OS}{LS} \times 100 \qquad (3-3)$$

$$F_\alpha = \frac{LO}{LS} \times 100 \qquad (3-4)$$

عندما يكون الوزن الجزئي للمادة الصلبة F_α وللمصهور السائل F_l.

ب- حساب الوزن الجزئي رياضيا :

على فرض أن الوزن الجزئي للمادة الصلبة F_α وللمصهور السائل F_l وتركيز العنصر في المادة الصلبة C_s وتركيز العنصر في المصهور C_l. وإذا كان التركيز الكلي لعنصر عند درجة معينة (T_1) تساوي C_o كما بالشكل(3-4) فإن الوزن الجزئي الصلب والسائل في العينة يمكن حسابه كما يأتي:

$$F_\alpha = \frac{C_o - C_l}{C_s - C_l} \qquad (5-3)$$

$$F_l = \frac{Cs - C_o}{Cs - C_l} \qquad (6-3)$$

مثال:

إذا كان وزن 1.0 كجم من سبيكة تتكون من 15 % سليكون و 85 % جرمانيوم في درجة حرارة العادية. أوجد وزن السيليكون في المصهور السائل عند درجة حرارة 1100 ^{o}م . علما بان نسبة السليكون الصلب عند هذه الدرجة يساوي 26 % ونسبة المصهور يساوي7 % .

الحل

الوزن الجزئي للمصهور في العينة:

$$F_l = \frac{26-15}{26-7} = 0.58$$

وزن السيليكون في المصهور السائل =

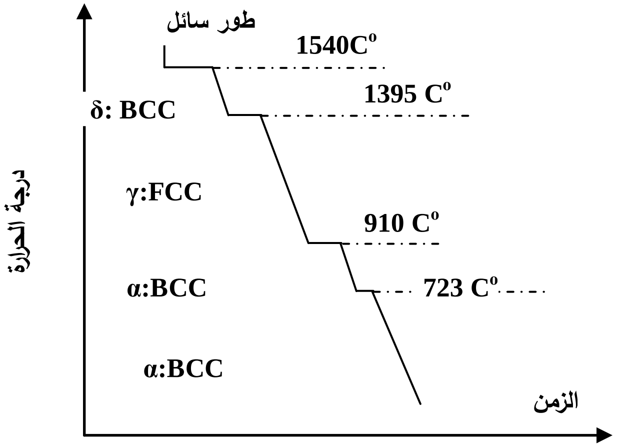
$$C_l \times F_l = 0.07 \times 0.58 = 0.04 \text{ Kg}$$

5-3 مخطط إتزان أطوار الحديد والكربون

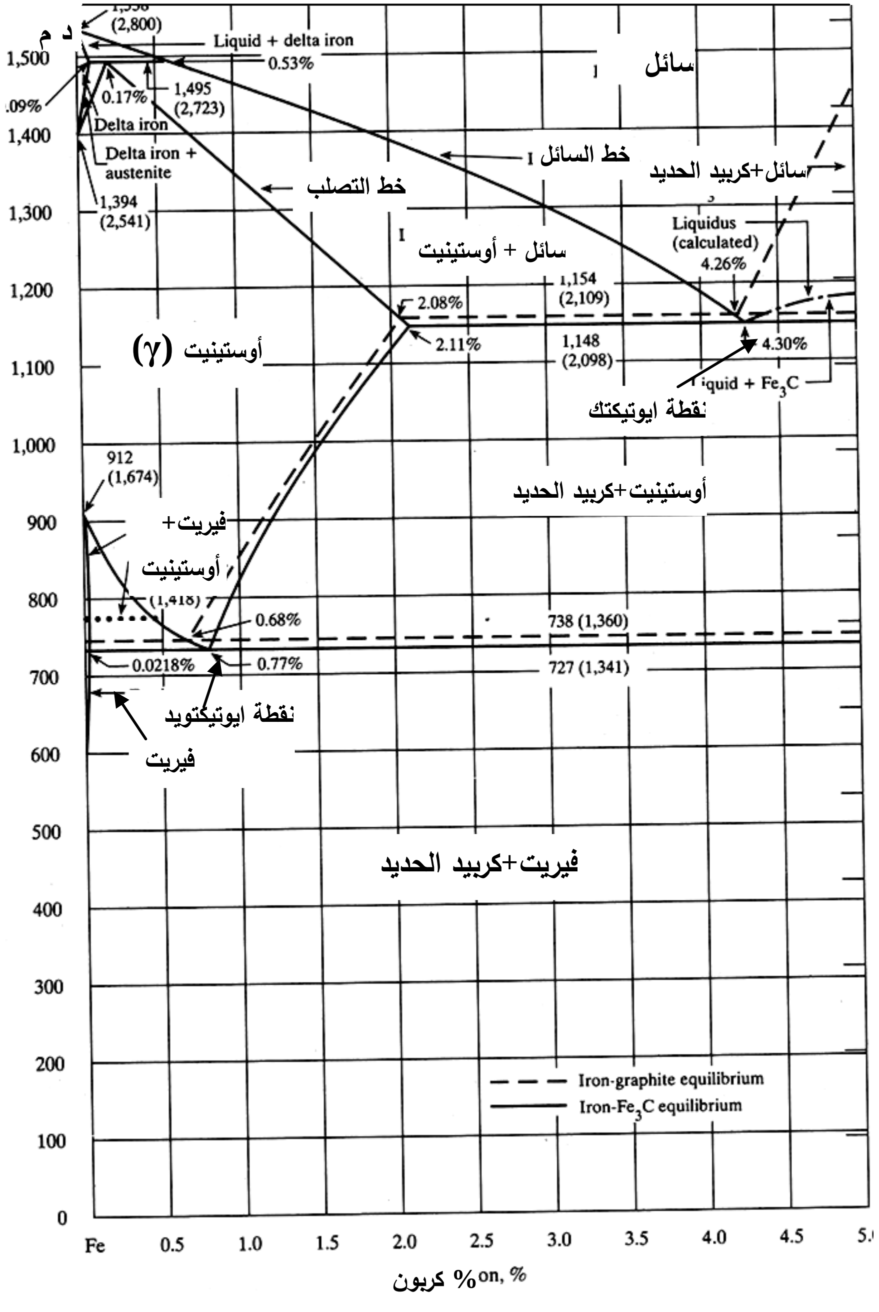
يعتبر مخطط الحديد والكربون **(Iron-carbon equilibrium phase diagram)** من أهم المخططات الثنائية من الناحية التقنية وأساساً لتصميم سبائك الصلب و يمثل العنصر الأهم في تحديد مناطق المعالجة الحرارية المختلفة للصلب الكربوني.

3- 5-1 منحنى التبريد للحديد النقي (TTT):

تتغير بنية معدن الحديد حسب درجة الحرارة، فعند درجة حرارة أعلى من 1534°م يكون المعدن مصهوراً سائلاً، ويتحول بعد ذلك إلى حديد متبلر على شكل مكعبات وسطية، ثم مكعبات سطحية، ويليها مكعبات وسطية عند درجة الحرارة العادية كما هو موضح بالشكل (3-5). وعندما يكون هناك عدد كبير من عينات الحديد والكربون، بنسب مكملة كما في المخططات الثنائية السابقة، ويتم تسخينها إلى درجة الانصهار، وبعد ذلك تبرد ببط مع مراقبة نقاط التحول من المصهور السائل إلى شبه الصلب ثم الصلب وكذلك التغير في نوع البلورات والأطوار، فإننا نتحصل على مخطط إتزان أطوار الحديد والكربون كما بالشكل (3 -6).



شكل (3 - 5) تحول البنية البلورية مع تغير الحرارة والزمن (TTT).



شكل (3 - 6) منحنى إتزان أطوار الحديد والكربون .

3- 2-5 أنواع أطوار الحديد والكربون:

يوجد في مخطط الحديد والكربون العديد من الأطوار لكل منها بناء بلوري محدد وتركيب مجهري معين وهو ما يمنحه خواص ميكانيكية متميزة.

1− كربيد الحديد (Fe_3C):

يحتوي كربيد الحديد علي 6.67 % بالوزن كربون والباقي 93.3 % حديد ويمتاز بأنه ذو صلادة عالية وهشاشة (Brittle) نتيجة لتغلغل ذرات الكربون بين ذرات الحديد كما أنه له قوة شد ضعيفة (35 MPa) ولكنه يتحمل قوة ضغط كبيرة. ويندرج كربيد الحديد الأقل من 2 % كربون مع مجموعة الصلب والأكثر من ذلك مع حديد الزهر ويعتبر كربيد الحديد اقل أهمية من الناحية التقنية مقارنة بالأنواع الأخرى.

2− أوستينيت (Austenite-γ):

يوجد الأوستينيت في حالة إتزان كيميائي مع الكربون عند درجات حرارة أعلى من 723 دم، وعند تبريده فجائيا يتكون محلول جامد من الحديد على شكل مكعبات سطحية متغلغلة فيها ذرات الكربون، ويكون أقصى ذوبان للكربون في المحلول 2 % عند نقطة 1146 د م ، ويقل ذوبانه إلى 0.8 % عند 723 ^{o}م.

وعند إنحلال الاستينيت إلى فيريت وبرليت أو فيريت وكربيد الحديد يكون التركيب المجهري مختلفا من عينة إلى أخرى وذلك إعتماداً على نسبة الكربون، فكلما زاد تركيز الكربون زادت كمية البرليت أو كربيد الحديد وتناقصت كمية الفريت في البنية المجهرية كما بالشكل (3 -7).

الخواص الميكانيكية:

للاستينيت مقاومة شد عالية تقارب 1000 MPa وإستطالة عند (2 بوصة) تساوي 10 % (عند نقطة إيوتيكتويد).كما أنه ذو صلابة (Toughness) عالية وصلادة متوسطة تقارب C40 على مقياس روكويل.

3- **ليدبوريت (Ledeburite):**

يتكون طور الليدبوريت من كربيد الحديد والاوستينيت بنسبة 4.3 % كربون عند درجة حرارة 1146 ^{o}م وهو ما يعبر عنه بنقطة إيوتيكتيك (Eutectic point). ويندرج هذا الطور ضمن حدود حديد الزهر ويتصف بأنه هش وذو صلادة عالية.

4- **فيريت (Ferrite-α):**

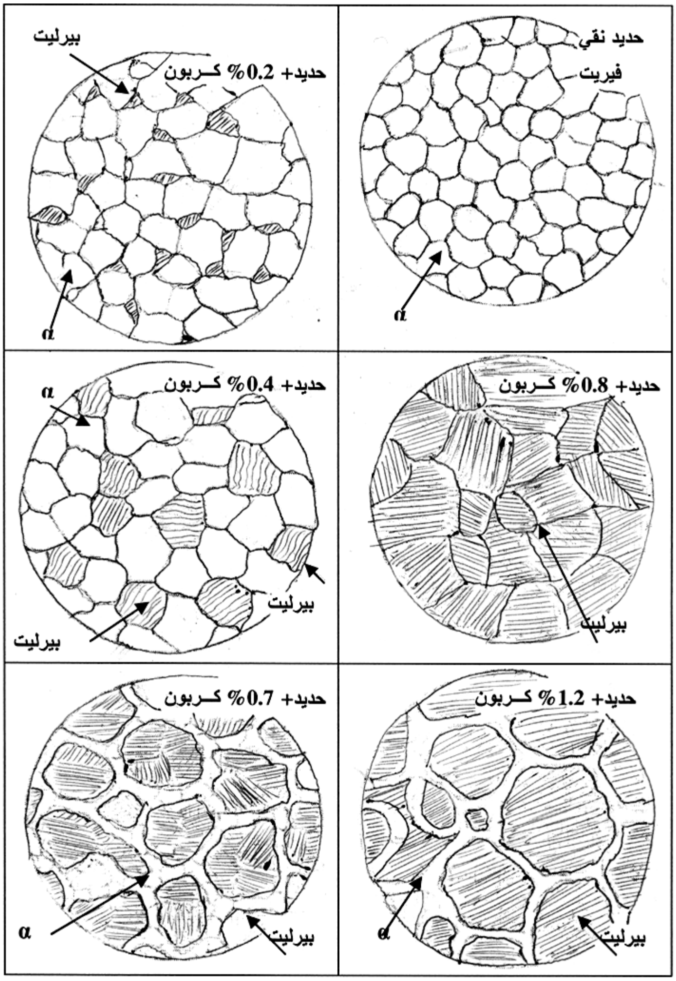
طور الفيريت عبارة عن محلول صلب من الحديد والكربون، حيث يوجد الحديد على شكل مكعبات وسطية تتغلغل فيها ذرات الكربون، ومن الملاحظ أن ذوبان الكربون في محلول الحديد الصلب لا يتجاوز 0.025 % عند درجة حرارة 723 ^{o}م وأقل من 0.008 % عند درجة الحرارة العادية. ويظهر الفيريت متجانسا تحت المجهر كما في الشكل (3 -7).

وتتمثل خواص طور الفيريت في مقاومة شد ضعيفة تساوي 280MPa وإستطالة عالية تقارب 40 % مع صلابة وصلادة منخفضة.

5- **بيرليت (Perlite):**

يتكون طور البيرليت من الفيريت وكربيد الحديد وهو مخلوط الاتزان عند تركيز 0.8 % كربون ودرجة حرارة 723 ^{o}م وينتج البيرليت من إنحلال طور

الأستينيت، ويظهر تحت المجهر على شكل صفائح رفيعة كما في الشكل (3 -7) ويتحمل هذا الطور قوة شد مقدارها 830 MPa وله استطالة تقارب 20 % وتعرف نقطة الاتزان هذه بنقطة إيوتكتويد (Eutectoid).



شكل(3-7) البنية الداخلية للصلب الكربوني عند تركيزات مختلفة للكربون.

3-5-3 التفاعلات الثابتة (Invariant Reactions):

يوجد هناك ثلاثة تفاعلات ثابتة رئيسية في مخطط إتزان الحديد و كربيد الحديد وتحدث هذه التفاعلات عند درجات حرارة محددة وهي كما يأتي:

1- تفاعل بريتكتيك (Peritectic reaction):

يحدث هذا التفاعل عند درجة حرارة تبلغ 1495 ^{o}م أي عند وجود مصهور الحديد كسائل يحتوي على 0.53 % كربون، حيث يتفاعل مع الفيريت من نوع دلتا المحتوي على 0.09% كربون لتكوين أوستينيت يحتوي على 0.17 % كربون وهذا التفاعل ليس له أهمية تكنولوجية بسبب أن هذه الأطوار تتحول إلى أطوار أخرى عند إنخفاض درجات الحرارة، و أن سبائك الحديد لا تستخدم عند هذه الحرارة العالية.

$$\text{Liquid } (0.53\ \%\ C) + \delta\ (0.09\ \%\ C) \xrightarrow{1495\ C^{o}} \gamma\ (0.17\ \%\ C)$$

2- تفاعل إيوتيكتيك (Eutectic reaction):

عند نقطة إيوتيكتيك كما بالشكل (3-6) يتحول مصهور الحديد المحتوي على 4.3 % كربون إلى أوستينيت يوجد به 2.08 % كربون وكربيد الحديد (6.67%). ويحدث ذلك عند 1148 ^{o}م.

$$\text{Liquid } (4.3\ \%\ C) \xrightarrow{1148\ C^{o}} \gamma\ (2.08\ \%\ C) + Fe_3C\ (6.67\ \%\ C)$$

وهذا التفاعل يوجد في منطقة عالية الكربون أي أنها لا تدخل في تصنيع الصلب وتقتصر على عدد قليل من حديد الزهر.

3- تفاعل إيوتيكتويد (Eutectoid reaction):

تعتبر نقطة ايوتيكتويد وما حولها من المناطق الرئيسية في تصنيع الصلب الكربوني والسبائك الحديدية الأخرى، حيث أن في هذه النقطة ينحل الاستينيت (% 0.8) كربون عند درجة حرارة أعلى من 723 ^{o}م إلى فيريت (0.02 %) كربون وكربيد الحديد عند انخفاض الحرارة إلى أقل من 723 ^{o}م وهذا الطور يعرف بالبرليت. والشكل (3- 6) يوضح منطقة ايوتيكتويد وأطوارها.

$$\gamma\ (0.8\ \%\ C) \xrightarrow{723C^{o}} \alpha\ (0.02\ \%\ C) + Fe_3C\ (6.67\ \%\ C)$$

أسئلة الفصل الثالث

1. عرف الطور.
2. أذكر المتغيرات الأساسية في قاعدة الطور.
3. لماذا نستثني الضغط من قاعدة الطور عند صهر المعادن.
4. أرسم منحنى إتزان أطوار الماء مبيناً عليه طور الماء السائل وطور البخار وطور الثلج، وكذلك مسار التبريد ومسار التبخير.
5. في منحنى أتزان أطوار الماء، بين الأطوار التي تكون في حالة إتزان على المسارات الآتية:
   - خط التبريد.
   - خط التبخير.
   - نقطة الإتزان الثلاثية (نقطة تلاقي المنحنيات).
6. أذكر المتغيرات الأساسية في قاعدة الطور.
7. سبيكة وزنها 2 كيلوجرام تحتوي على 60 % بالوزن نيكل و 40 % نحاس، ولها منحنى إتزان كما بالشكل(3-3)، فإذا تم تسخين العينة إلى 1300 دم، أوجد ما يأتي:
   - ما هي الأطوار المختلفة للعينة عند حرارة 1300 دم.
   - ما نسبة كل طور في العينة عند الإتزان.
   - بين كمية كل عنصر في كل طور من أطور العينة عند الإتزان.

8. أرسم منحنى الإتزان للعنصرين س وص وفق البيانات الموضحة بالجدول، مع بيان نسبة وكمية الطور السائل والصلب لعينة وزنها 2 كجم وتحتوي على 40 % من العنصر ص عند درجة حرارة 450 دم.

العنصرص%	0.0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
بداية التجمد دم	300	350	450	500	550	600	650	680	700	710	700
نهاية التجمد دم	300	300	310	320	340	380	400	420	520	580	700

9. وضح بالرسم الأطوار المختلفة ودرجات الحرارة ونسب الكربون في مخطط إتزان الحديد والكربون.

10. قارن بين الخواص الميكانيكية لطوري الفيريت والسيمنتيت.

11. عند تبريد عينة من الصلب الكربوني في طور الأستينيت إلى درجة الحرارة العادية، بين مكونات أطوار الحديد عند نقطة إيوتيكتويد وما قبليها وما بعدها.

12. أذكر نقاط الإتزان الثابتة الثلاثية في منحنى إتزان الحديد والكربون، مع توضيح تأثير الحرارة والتفاعلات الناتجة في كل منها.

13. مشغولة معدنية من الحديد تحتوي على 0.8 % عند درجة حرارة 750 دم، تم تبريدها إلى 710 دم {أقل بقليل من نقطة إيوتيكتويد} . بفرض أن جميع الأستينيت قد تحول إلى طور الفيريت وكربيد الحديد، وأن أقصى تركيز لكربيد الحديد يساوي 6.67 % ، أوجد:

- نسبة الفيريت المتكون في المحلول الجامد.
- أوجد نسبة كربيد الحديد المتكون في المحلول الجامد.

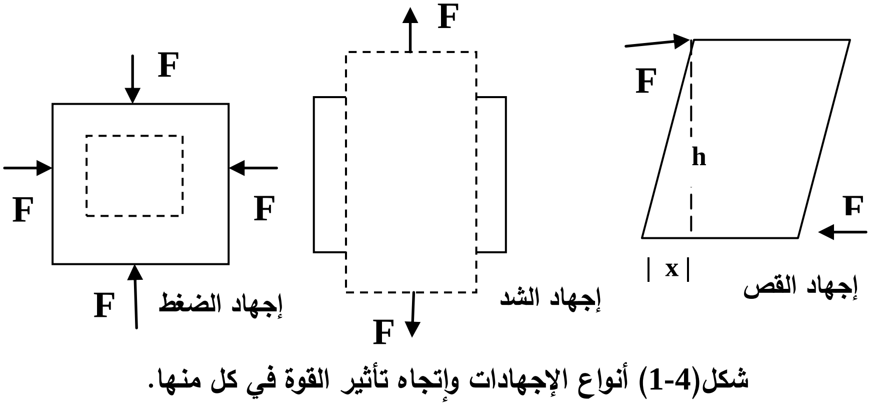
الفصل الرابع

الخواص الميكانيكية للمواد

إن تحديد الخواص الميكانيكية للمادة هي الخطوة الأولى نحو التصميم، فعند تصميم قطعة ميكانيكية في آلة أو محرك أو هيكل معدني أو غير معدني فإن الأمر يتطلب دراسة ظروف التشغيل مثل قوة الشد أو الضغط أو القص التي سيتعرض لها ونوع التحميل هل هو دوري أو ثابت، وكذلك الصلادة والصلابة المطلوبة لمقاومة الإجهادات التي ستؤثر على القطعة تحت التصميم، وهذا يؤكد أهمية التعرف على طرق قياس الخواص الميكانيكية للمواد.

1-4 أنواع الإجهادات:

عند تعريض أي جسم إلى قوة خارجية، وليكن إجهاد الشد مثلاً، فإن ذلك سيؤدي إلى تغيير في شكل المادة الصلبة وفى حالات أخرى إلى الكسر أو الانهيار، وبالإضافة إلى إجهاد الشد يوجد هناك أنواع أخرى من الإجهادات المؤثرة مثل إجهاد القص وإجهاد الضغط كما هو موضح في الشكل(4-1) .



شكل(4-1) أنواع الإجهادات وإتجاه تأثير القوة في كل منها.

1− **إجهاد وإنفعال القص المرن (Elastic shear strain and stress):**

الإنفعال المرن هو عبارة عن كمية الإنفعال على الطول العمودي للعينة فإذا كان إنفعال القص المرن (γ) وطول الإنفعال(x) والطول العمودي للجسم (h) فإن إنفعال القص المرن يمكن الحصول عليه من المعادلة الآتية:

$$\gamma = \frac{x}{h} \qquad (1-4)$$

ومن الملاحظ أن التأثير على جسم بقوة قص مرن لا يغير في الحجم ولكن يغير في الشكل فقط كما بالشكل(1-4) .ويتم حساب إجهاد القص (τ) من معامل المرونة للقص (G) وإنفعال القص المرن (γ) ومنها نجد أن:

$$\tau = G\gamma \qquad (2-4)$$

حيث أن: $\gamma = \frac{x}{h}$

2− **الإجهاد الضاغط (Compressive Stress):**

من خلال وجود قوى خارجية من جميع الجوانب على جسم مكعب مثلا، يتناقص حجم الجسم بمقدار ΔV ولكن الشكل يبقى كما هو عليه. فالإنفعال (Δ) يمكن قياسه بالنسبة للحجم الأصلي (V)، وبذلك يتم حساب إنفعال الضغط كما يأتي:

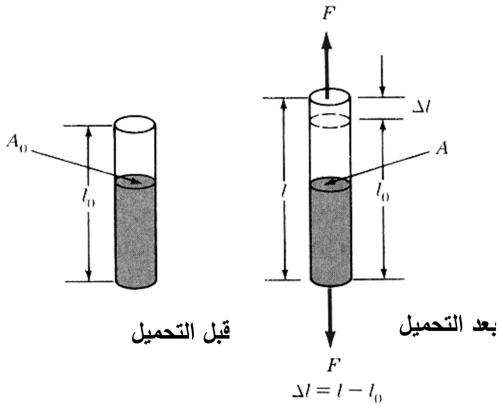
$$\Delta = \frac{\Delta V}{V} \qquad (3-4)$$

وبالمثل يمكن حساب إجهاد الضغط (σ) بمعرفة معامل المرونة الحجمي للمادة (B) وإنفعال الضغط:

$$\sigma = B\Delta \qquad (4-4)$$

3 - الشد المحوري (Uniaxial tensile):

يعتبر هذا النوع من الشد أساساً لمعظم التجارب التي تقام على المواد لمعرفة قوة تحملها للشد ويتم تصميم العديد من الآلات الميكانيكية على أساسها، والشكل(2-4) يوضح قضيب معدني معرض لقوة شد وما ينتج عنها من إستطالة، ويمكن متابعة التغيرات التي تحدث علي المعدن من رسم العلاقة بين القوة المؤثرة على الجسم والإنفعال الذي يحدث له.



شكل (2-4) التأثير على قضيب معدني بقوة شد وما ينتج عنها من انفعال.

ويحتوي منحنى الإجهاد والإنفعال للشد المحوري على منطقتين هما المنطقة المرنة والمنطقة اللدنة، وقد تظهر بعض المواد إحدى المنطقتين فقط. والشكل(3-4) يبين منحنى الإجهاد والإنفعال للمواد المطيلة والمواد الهشة.

ا- المنطقة المرنة :

عندما يتعرض جسم ماء إلى إجهاد أقل من نقطة الخضوع فإن الإنفعال يكون مرنا بمعنى أن الجسم يعود إلى حالته الأصلية بمجرد زوال الإجهاد، وهذا يؤكد أن الإنفعال يتناسب طرديا مع الإجهاد وذلك طبقا لقانون هوك الشهير.

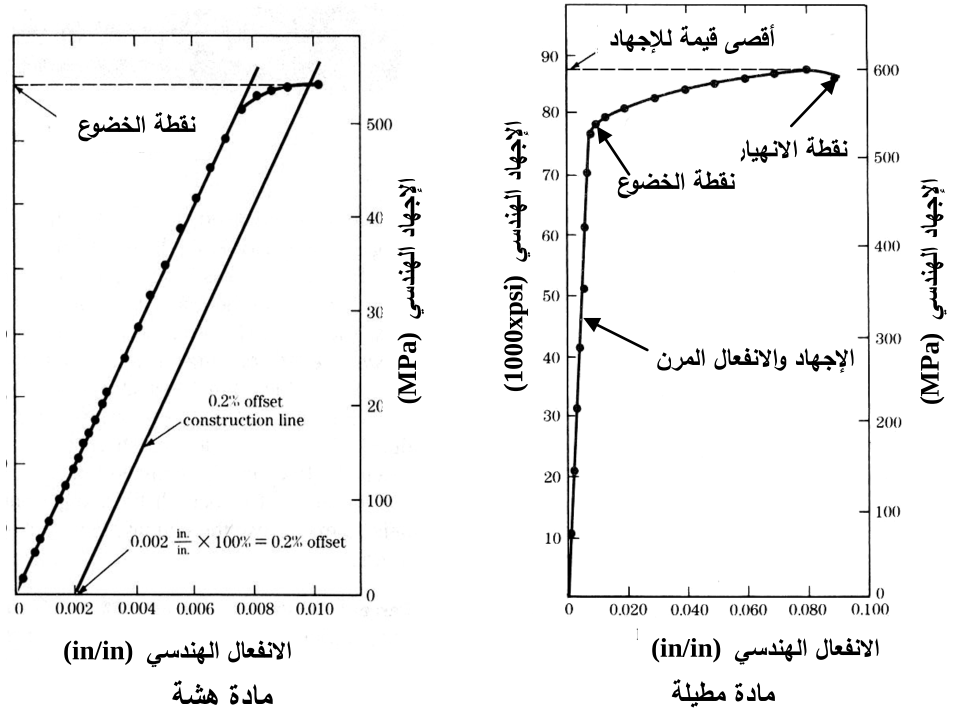
الإجهاد مقسوما على الإنفعال = مقدار ثابت

وهذا المقدار الثابت يعرف بمعامل المرونة و يكون صالحا عندما يكون الإنفعال لا يزيد عن 0.02 % ، في حالة المواد المتبلرة، وعادة ما ترسم هذه النسبة كخط مستقيم موازي للمنحنى في المنطقة المرنة كما بالشكل(3-4).

ب- المنطقة اللدنة:

عند إزدياد الإجهاد عن قيمة معينة يتغير شكل منحنى الإجهاد والإنفعال عن السلوك الخطي، وبذلك لا يكون المنحنى خاضعا لقانون هوك، كما أن التغيير في شكل العينة يكون دائما ولا يرجع إلى حالته الأصلية ويحدث ذلك عند نقطة الخضوع وهي نقطة التغيير الدائم من الإجهاد المرن إلى الإجهاد اللدن، وتعرف كذلك بحد المرونة (Plastic limit).

وتحدد هذه النقطة مقدار تحمل المادة للاجهادات قبل حدوث التغير الدائم في شكلها، ولذلك تعتبر من القياسات المهمة في تصميم الالات والهياكل المعدنية، وتوجد عدة نظريات تفسر هذا السلوك مثل وجود شوائب في المعدن على شكل تغلغل أو إحلال، ويستمر إزدياد الإنفعال مع الإجهاد إلى أقصى قيمة للإجهاد، ثم يتناقص حتى نقطة الإنهيار عندما لا يستطيع المعدن تحمل القوة المؤثرة عليه.



شكل (4 - 3) منحنى الإجهاد والإنفعال للمواد المطيلة والمواد الهشة.

ج- قوة الشد القصوى (Ultimate tensile stress):

قوة الشد القصوى هي أكبر قيمة للإجهاد في منحنى الإجهاد والإنفعال ويكون بعد هذه النقطة بداية العد التنازلي لانهيار المعدن. وتكون هذه القيمة ظاهرة للمعادن المطيلة، أما السبائك الهشة فإن إجهاد وإنفعال الكسر يحدث بعد نقطة الخضوع بقليل ولن يكون هناك منطقة لدونة أو قوة شد قصوى.

وهكذا فإن منحنيات الإجهاد والإنفعال يمكن تقسيمها إلى نوعين رئيسيين، فالمواد والمعادن المطيلة (Ductile) القابلة للسحب والطرق مثل الحديد والصلب الكربوني والتيتانيوم تظهر منحنى متكامل، في حين أن المواد والمعادن الهشة تقتصر

على المنطقة المرنة وقليل من المنطقة اللدنة بدون توضيح حد المرونة أو نقطة الخضوع ومن هذه المعادن حديد الزهر وسبائك الالومنيوم القوية والزجاج والمواد الخزفية وبعض الألياف الصناعية وغيرها.

2-4 العلاقة بين الإجهاد والإنفعال:

1-2-4 الإجهاد الهندسي والحقيقي (Engineering and True Stress):

الإجهاد هو عبارة عن كمية القوة المؤثرة على وحدة مساحة من الجسم، وهناك تعريف آخر وهو أن الإجهاد عبارة عن مقدار مقاومة الجسم للقوة الخارجية، وينتج عن الإجهاد إذا وصل إلى حد معين تغير في شكل الجسم يسمى إنفعال (Strain)، وهناك نوعان من الإجهادات:

أ – الإجهاد الهندسي (Engineering stress):

أو الإجهاد الاعتيادي (Nominal stress)

وهو عبارة عن مقدار القوة المؤثرة على مساحة المقطع الأصلية للعينة.

$$\sigma_E = \frac{F}{A_0} \qquad (5-4)$$

حيث أن:

σ_E: الإجهاد الهندسي (Pa).

F: القوة المؤثرة (N).

A_0 : المساحة الأصلية (m^2) .

ب- الإجهاد الحقيقي (True stress):

الإجهاد الحقيقي ينتج من تأثير القوة على مساحة مقطع العينة الحقيقية أي المساحة لحظة قياس القوة المؤثرة، ويكون الإجهاد الحقيقي عادة أكبر من الإجهاد الهندسي.

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \qquad (6-4)$$

حيث أن:

σ_t الإجهاد الحقيقي (Pa).

F: القوة المؤثرة (N).

A : المساحة الحقيقية لحظة الإختبار (m^2) .

وعادة ما يكون الإجهاد في نطاق ميجا نيوتن / متر مربع أو ميجا باسكال (MP)

4- 2-2 الإنفعال الهندسي والحقيقي (Engineering and True Strain):

الإنفعال في حالة الشد المحوري يعبر عن مقدار الاستطالة الناتجة عن الإجهاد، ويوجد هناك نوعان من الإنفعال كما في حالة الإجهاد.

ا- الإنفعال الهندسي:

يتم حساب الإنفعال الهندسي (Engineering strain) بقسمة مقدار التغير في طول العينة بعد التأثير عليها بالإجهاد على الطول الأصلي.

أي أن الإنفعال الهندسي (e) يساوي:

$$e = \frac{L - L_o}{L_o} \qquad (7-4)$$

ولا توجد وحدة لقياس الإنفعال وتحسب كنسبة مئوية.

ب - الإنفعال الحقيقي:

يمثل الإنفعال الحقيقي هندسيا بالمساحة تحت المنحنى في منحنى الإجهاد الحقيقي والإنفعال الحقيقي ويعبر عنه رياضيا كما يأتي :

$$\varepsilon = \int_{l_o}^{l} \frac{dl}{l} = \ln\frac{l}{l_o} = \ln\left(\frac{l_o + \Delta l}{l_0}\right) = \ln(1+e) \qquad (8-4)$$

عندما يكون Lo = الطول الأصلي للعينة.

L = الطول الحالي عند أي قيمة للإجهاد.

ε = الإنفعال الحقيقي. e = الإنفعال الهندسي.

Δl = مقدار التغير في طول العينة أي مقدار الإستطالة.

مثال:

إذا كانت مساحة مقطع عينة قبل القيام بإختبار قياس قوة الشد تساوي 0.2 سم^2 . فما هي مساحة المقطع عندما يكون الإنفعال الهندسي يساوى 0.3 .

الحل:

$$e = \frac{\Delta l}{l_o}$$

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_o}\right) = \ln\left(\frac{l_o + \Delta l}{l_o}\right) = \ln(1+e)$$

$$\because Al = A_o l_o \qquad \therefore \frac{l}{l_o} = \frac{A_o}{A}$$

$$\because \varepsilon = \ln\frac{A_o}{A} = \ln(1+e) \qquad \therefore \frac{A_o}{A} = 1+e$$

$$\therefore A = \frac{A_o}{1+e} = \frac{0.2}{1+0.3} = 0.15$$

ويلاحظ في هذا الحل إفتراض عدم وجود تغيير في حجم العينة وأقتصر التغيير في شكلها فقط، وكانت النتيجة تساوي 0.154 سم^2 .

3-2-4 العلاقة بين الإجهاد والإنفعال المرن:

حيث أن العلاقة بين الإجهاد والإنفعال في المنطقة المرنة عادة ما تكون خطية، فإن تمثيلها يكون بمعادلة خط مستقيم يمر بنقطة الصفر، ويمثل الميل قيمة ثابتة تعرف بمعامل المرونة(E)، والمعادلة(4-9) توضح العلاقة الخطية بين الإجهاد والإنفعال.

$$\sigma = E\varepsilon = E\frac{\Delta l}{l_o} \qquad (9-4)$$

كما يمكن التعبير عن معامل المرونة في منطقة غير خطية من المنحني أو لبعض المنحنيات التي لا تظهر علاقة خطية بين الإجهاد والإنفعال بتفاضل الإجهاد بالنسبة للإنفعال كما في المعادلة(4-9).

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \qquad (10-4)$$

ويتناسب معامل المرونة للشد مع معامل المرونة للقص أو معامل المرونة الحجمي للضغط كما يأتي:

$$E = 2G(1+\nu) \qquad (11-4)$$

$$E = 3B(1-2\nu) \qquad (12-4)$$

حيث أن:

E: معامل المرونة للشد المحوري.

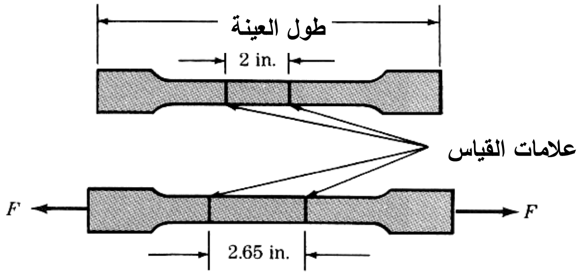
G: معامل المرونة للقص.

B: معامل المرونة الحجمي للضغط.

ν: نسبة بواسون وهي في مدى 0.25 إلى 0.35 للمعادن .

4-2-4 طريقة قياس الشد المحوري معمليا:

يقاس الشد المحوري بإستعمال عينات قياسية ذات أبعاد محددة تم تصنيعها من صفائح أو أقطاب دائرية، بحيث يمكن توحيد النتائج المتحصل عليها، والشكل(4-4) يوضح أبعاد عينة قياس الشد لصفيحة معدنية، ويلاحظ أن منطقة القياس هي التي يتم عندها تحديد الإنفعال، ومع وجود ألآت القياس الحديثة فان هذه الالآت تقوم بقراءة الإجهاد والإنفعال مع الزمن ثم رسم منحنى الإجهاد والإنفعال كاملا، ولا يقوم المشغل إلا بتحضير العينات وتثبيتها على الآلة.



شكل(4-4) أبعاد عينة قياسية لتعيين قوة الشد.

4- 3 الإطالة أو المطيلية (Ductility):

المطيلية عبارة عن قياس الإنفعال المؤدي إلى الكسر (أي إنهيار المادة) وهذه الخاصية مهمة في الكثير من التطبيقات الهندسية المتعلقة بتشكيل المعادن مثل الدرفلة والسحب وتستعمل إختبارات الشد لقياسها بطريقتين هما:

1- نسبة الاستطالة:

$$El = \frac{L_f - l_o}{l_o} \times 100 = \varepsilon_{max} \times 100\% \qquad (13-4)$$

عندما تكون:

El: الاستطالة. ε_{max}: أقصى إنفعال.

lo: الطول الأصلي.

l_f: والطول عند الكسر.

2- النقص في مساحة المقطع:

يمكن قياس الإنفعال عن طريق تحديد التغير في مساحة مقطع العينة قبل وبعد التحميل ثم التعويض في المعادلة الآتية:

$$RA = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100 \qquad (14-4)$$

عندما تكون:

RA: نسبة النقص في المساحة.

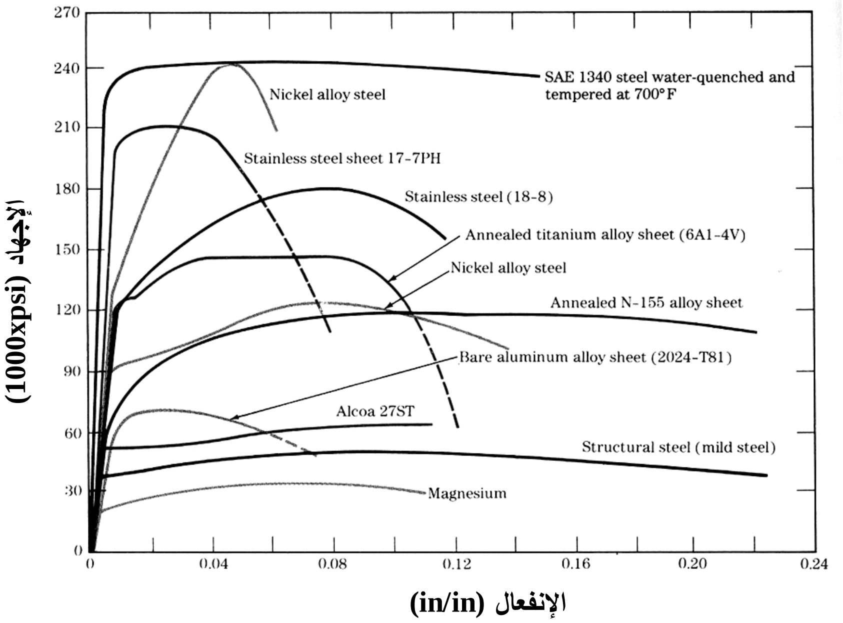
Ao: المساحة الأصلية.

A_f: المساحة عند الكسر أو بعد التحميل.

وبصورة عامة تعتبر المواد مطيلة عندما تكون (RA) أكبر من 30 % والمواد الهشة تلك التي لها مطيلية أقل من 10 % .

ويختلف منحني الإجهاد والإنفعال من معدن إلى آخر فمنها السبائك ذات قوة شد عالية مثل سبائك الصلب الذي لا يصداء وسبائك صلب النيكل ومنها المتوسطة

مثل سبائك التيتانيوم والالومنيوم ومنها ذات قوة شد ضعيفة مثل الصلب منخفض الكربون وسبائك الماغنيسيوم، والشكل(4-5) يبين قوة الشد لبعض السبائك الهندسية.



الشكل(4-5) قوة الشد لبعض السبائك الهندسية.

4-4 الصلابة (Toughness):

صلابة المادة هي مقدار الشغل (Work) لوحدة حجم المطلوب لعمل كسر أو بمعنى أخر هي عبارة عن كمية الطاقة التي يتحملها الجسم قبل الكسر ولذلك يعرفها البعض بمقاومة المادة للصدمات. فمثلا عند إختبار الشدة يمكن حساب الشغل من تكامل المساحة تحت منحنى الإجهاد والإنفعال للمعدن أو المادة (أي مجموع المساحة تحت المنحنى) كما بالشكل (4-6) .

$$\frac{W}{V} = \int F \frac{dl}{Al} = \int_{0}^{\varepsilon_f} \sigma_f \, d\varepsilon \qquad (15-4)$$

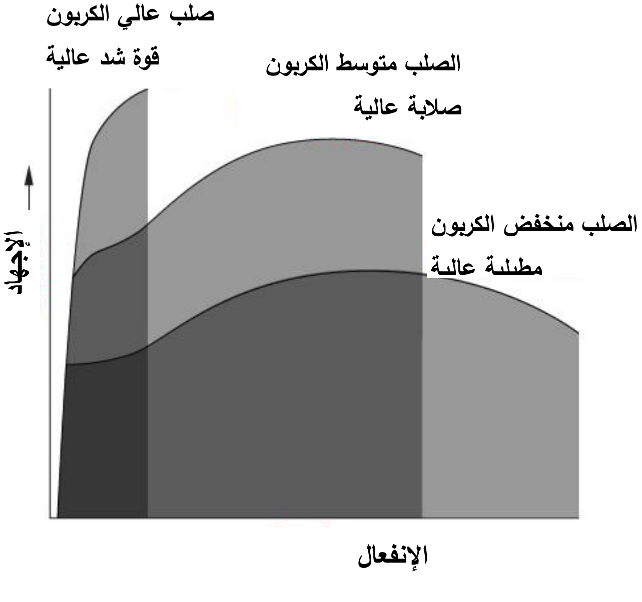
عندما تكون:

F: القوة المؤثرة. ε_f: والإنفعال عند الكسر.

dl: التغير في الطول. σ_f: الإجهاد.

A: مساحة المقطع. $d\varepsilon$: مقدار التغيير في الإنفعال.

l: طول العينة.



شكل (4 - 6) مقدار الصلابة.

مثال:

أوجد طاقة الإنفعال المرن لعينة في حالة شد بإجهاد قدره 40000 باوند/ بوصة مربعة إذا كان معامل المرونة يساوى 10^7 باوند/ بوصة مربعة .

الحل

هذه الطاقة عبارة عن شغل لكل وحدة حجم (work/volume)

$$w/v = \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon = \int_0^{\varepsilon} E\varepsilon d\varepsilon = \frac{(E\varepsilon)^2}{2}$$

$$\because \quad \varepsilon = (\frac{\sigma}{E}) \qquad \therefore \quad w/v = \frac{\sigma^2}{2E} = \frac{(40000)^2}{2x10^7} = 80\,psi$$

والنتيجة 80 باوند/ بوصة مربعة .

1-4-4 إختبار الصدم (Impact test):

من الطرق السهلة والبسيطة التي يمكن بها قياس الصلابة النسبية للمعادن طريقة إختبار الصدم أو الصدمة ويستخدم لذلك ألة لقياس الصلابة تتكون من مطرقة لها شفرة حادة مثبة في نهاية ذراع متصل بمفصل بحيث تكون المطرقة حرة الحركة ويوجد أعلى المفصل تدريج بمؤشر يوضح مقدار الصلابة بالجول وفي قاعدة الآلة يوجد سندان ذو شفتين يتم تثبيت العينة على حافتيهما الداخلية ويكون الطرق من الناحية الخلفية للعينة كما بالشكل(4-7).

ويتم حساب الصلابة من تعيين مقدار طاقة الوضع الكفيلة بتكسير العينة وهذه يمكن حسابها من وزن المطرقة وفرق إرتفاعها قبل وبعد تكسير العينة وذلك حسب المعادلة الآتية.

الصلابة النسبية = وزن البندول × الفرق في إرتفاع المطرقة

$$W = F(\Delta h) \qquad (16\text{-}4)$$

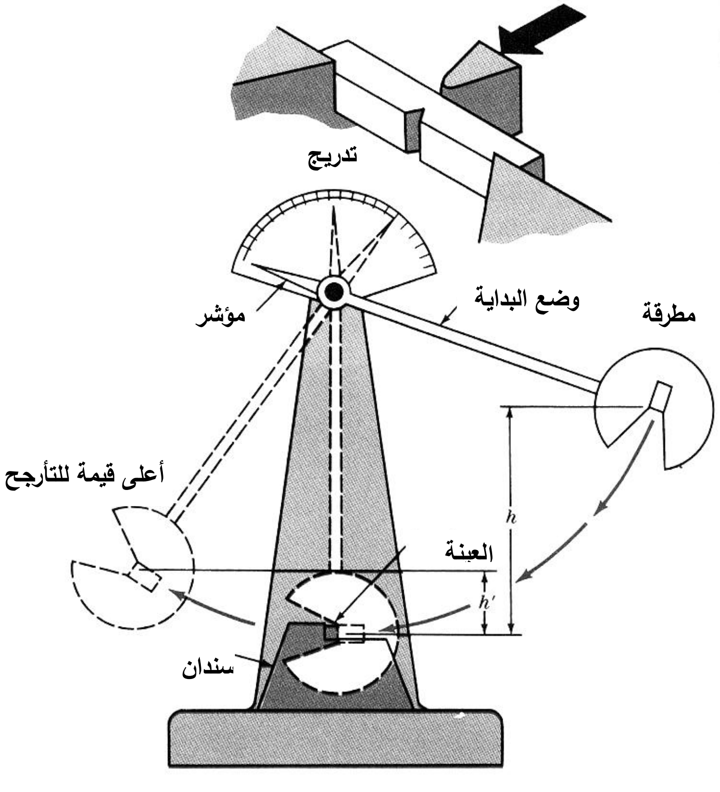
$$W = mg(\Delta h) \qquad (17\text{-}4)$$

حيث أن:

m: كتلة المطرقة.

F: القوة.   g: ثابت الجاذبية الأرضية.

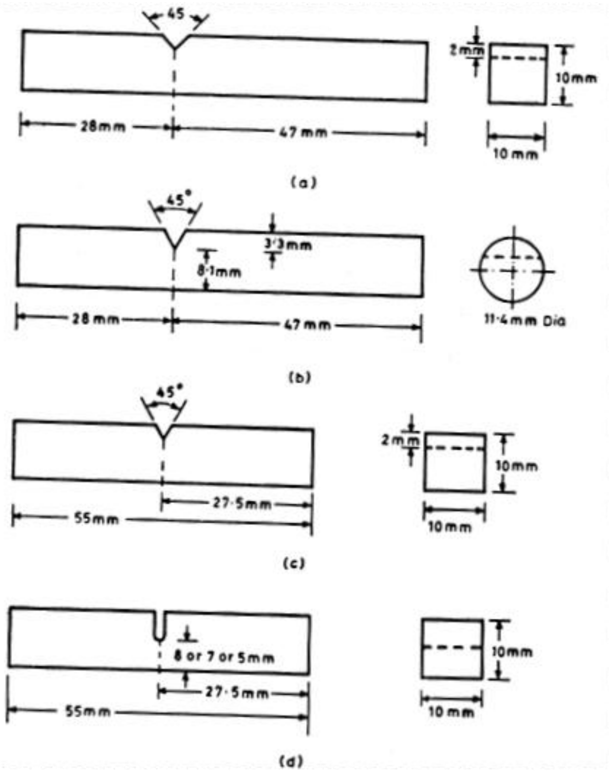
إلا أن الآلة عادة ما يوجد بها تدريج بمؤشر يقوم بتعيين مقدار الصلابة بالجول دون اللجؤ إلى المعادلات الحسابية السابقة.



الشكل(4-7) يوضح آلة قياس الصلابة النسبية للمواد.

ويوجد هناك طريقتان لتحضير العينات كما بالشكل(4-8).

فالطريقة الأولى تسمى طريقة شاربى (Charpy test) وتحضر العينة بمقياس 10x10x55 مم ويعمل لها شق بعمق 2 مم في وسط العينة على شكل حرف V في اللاتينية وبزاوية 45 درجة، أو قد يكون الشق على هيئة فتحة مفتاح (Key hole) كما بالشكل(4-8) وتثبت العينة من الجانبين على الجهاز بحيث يكون طرق العينة من الخلف، وتخضع هذه التجارب لمواصفة الجمعية الأمريكية لإختبار المواد (ASTM E23).



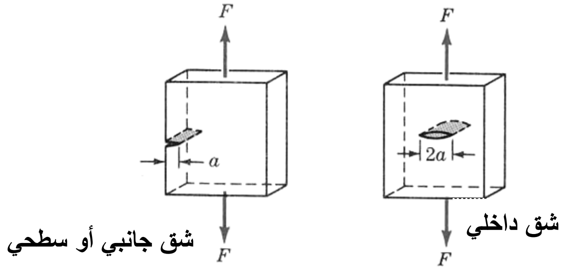
شكل (4-8) أنواع عينات قياس الصدم بطريقة أيزود، وطريقة تشاربي.

والطريقة الأخرى تسمى إيزود (Izod test) ويكون الحز بعمق 2 مم كذلك وبزاوية 45 درجة ويعمل على مسافة ثلث العينة، ويكون التثبيت من ناحية الطول

الأكبر في العينة كما أن الطرق يكون من ناحية الحز وعلى الطرف الصغير كما بالشكل(4-8).

4- 4- 2 صلابة الكسر:

إن ما يعبر عنها بصلابة الكسر(Fracture Toughness) أي الصلابة عند إجهاد وإنفعال الكسر تتناسب مع الطاقة المستهلكة في التشوه اللدن ولكن من الصعوبة قياس هذه الطاقة عمليا ولذا أستحدث لها معامل يتناسب مع الإجهاد ويسمى معامل شدة الإجهاد (Stress intensity factor) ليحدد مقدار الإجهاد المؤدي إلى الكسر لمعظم المعادن، ويستخدم لذلك عينات ذات شق داخلي أو جانبي كما بالشكل(4-9).



شكل (4-9) يوضح وضع الشق الجانبي والداخلي عند قياس صلابة الكسر.

وعند تعريض العينة لإجهاد الشد فان الشق يزداد مع زيادة القوة المؤثرة حتى الانهيار، وخلال التجربة يتم قياس طول الشق ومقدار الإجهاد على فترات زمنية ويمكن حساب معامل شدة الإجهاد من المعادلة الآتية:

$$K_I = \alpha\sigma\sqrt{\pi a} \qquad (18-4)$$

عندما يكون: K_I: معامل شدة الإجهاد (Stress intensity factor).

σ: الإجهاد الاعتباري أو الهندسي (Nominal stress).

a: طول الشق (Crack).

α: معامل يعتمد على نوع العينة والشكل الهندسي للشق.

والجدير بالذكر أن الإنهيار الكامل أي الكسر لجسم ما يحدث عندما يصل معامل شدة الإجهاد إلى نقطة حرجة تسمى صلابة الكسر (Fracture toughness) أو معامل شدة الإجهاد الحرج (K_{Ic})، وهذا المعامل يمكن حسابه من المعادلة الآتية:

$$K_{IC} = \sigma_f \sqrt{\pi a_f} \qquad (19-4)$$

عندما يكون:

K_{IC} : صلابة الكسر وله وحدة ميجا باسكال م$^{1/2}$ أي (MP√m).

σ_f : الإجهاد الاعتيادي لحظة الكسر.

a_f : الطول الحرج للشق أي طول الشق لحظة الكسر.

ويمتاز هذا المعامل بأنه يقدم قيمة تعبر عن مقدار صلابة المعدن، والجدول (4 - 1) يبين قيمة صلابة الكسر لبعض السبائك غير الحديدية القوية.

جدول(4 – 1) صلابة الكسر لبعض السبائك.

Material	K_{Ic} (MPa √m)
Ti-6 Al- 4V	54
2024-T3	26
7075 -T6	24

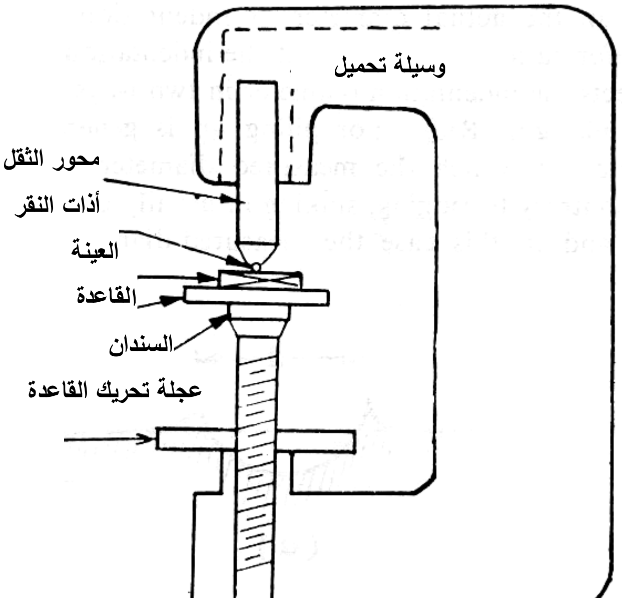
للمزيد حول إختبار كسر المعادن يراجع:

Fracture toughness testing P30, ASTM STP No. 381 (1965) and ASTM E399.

5-4 الصلادة (Hardness):

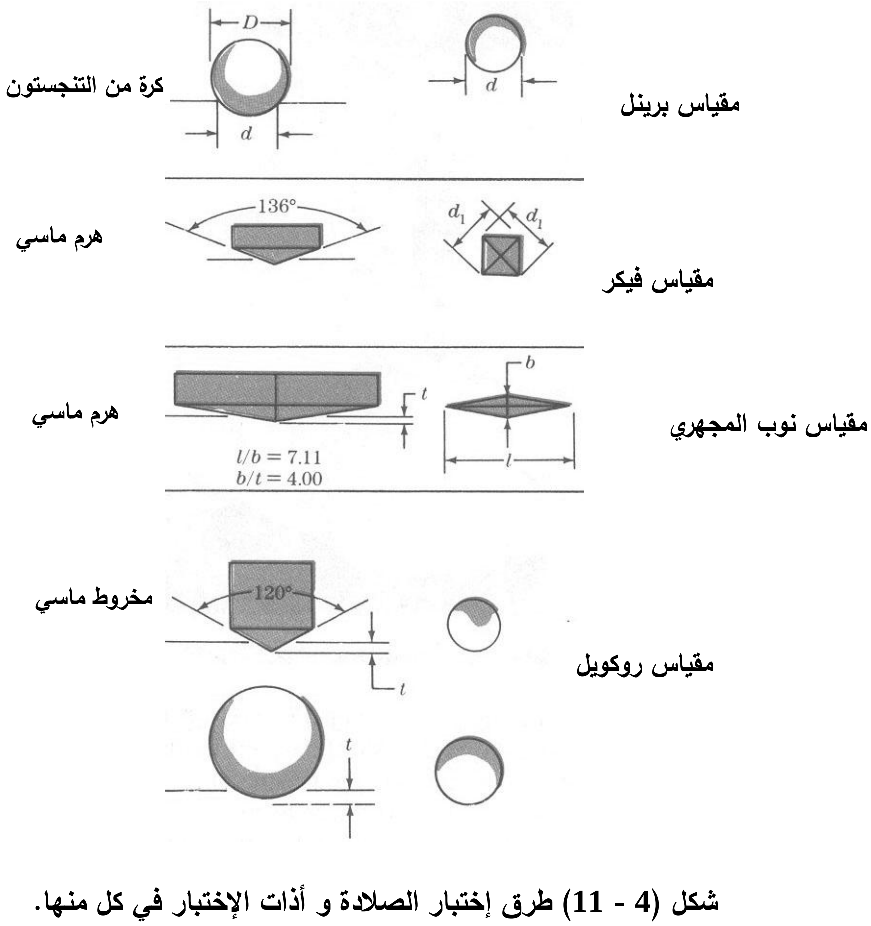
يعتمد مفهوم الصلادة على نوعية التخصص الدقيق الذي تستخدم لأجله، فمثلا عند مهندسو التصميم عادة ما تعني قيمة معينة تعطي معلومات عن قوة المعدن ومعالجته الحرارية، وبالنسبة للعاملين في مجال الإختبارات الميكانيكية فإنها تدل على مقاومة المعدن للخدش (Indentation)، كما أن وسائل إختبار الصلادة تتدرج من البسيطة جداً مثل إستخدام المبرد عند الحدادين أو الظفر عند الجيولوجيين إلى إستعمال وسائل رقمية متقدمة تعطي قيمة الصلادة مباشرة.

وتستخدم أدوات النقر المختلفة ضمن جهاز لقياس الصلادة يحتوي على ثقل أو وسيلة تحميل مع تدريج ووسيلة تثبيت للعينة كما بالشكل(4-10).



شكل(4 -10) يوضح تركيب ألة قياس الصلادة.

ولقد صممت معظم إختبارات الصلادة على أساس إستعمال أداة للخرق أو الخدش مؤثر عليها بقوة محددة لفترة زمنية معينة والشكل(4 -11) يبين أهم أدوات الخدش أو النقر المستعملة لقياس الصلادة .



شكل (4 - 11) طرق إختبار الصلادة و أذات الإختبار في كل منها.

4-5-1 مقياس الصلادة لبرينل (Brinell Hardness):

يستخدم مقياس برينل كرة من الصلب أو التنجستون ذات قطر 10 مم كأذات للنقر وتعرض الكرة لوزن قدره 3000 كجم لمدة 10 أو 15 ثانية . أما بالنسبة للمعادن والمواد الأقل صلابة فإن الوزن يخفض إلى 500 كجم والزمن إلى 30 ثانية، ويقاس قطر آثر الكرة على المعدن بمجهر معد بتدريج من المليمترات ويمكن تعيين الصلادة من التدريج أو بالتعويض في المعادلة الآتية:

$$BHN = \frac{P}{(\pi D/2)(D-\sqrt{D^2-d^2})} = \frac{2P}{\pi D(D-\sqrt{D^2-d^2})} \qquad (20-4)$$

عندما يكون:

P: مقدار الثقل بالكيلوجرام. d: قطر آثر الكرة بالمليمتر.

D: قطر الكرة بالمليمتر. t: عمق الأثر بالمليمتر.

BHN: مقياس برينل للصلادة كجم / مم2

4-5-2 مقياس فيكر للصلادة (Vickers hardness)

يستعمل لقياس الصلادة في هذه الحالة هرم ماسي ذو قاعدة مربعة وزاوية بين الأضلاع تساوي 136 درجة كأذات للنقر، ويتم قياس الصلادة بتعيين طول قطر مربع الأثر ثم التعويض في معادلة فيكر الآتية:

$$VHN = \frac{2P\sin(\pi/2)}{l^2} = \frac{1.845P}{l^2} \qquad (21-4)$$

عندما يكون : P مقدار الثقل (كجم)

L: طول قطر مربع الأثر بالمليمتر.

θ : الزاوية بين أي سطحين متقابلين في الهرم وتساوى 136 درجة.

ومن مميزات هذا المقياس تدرج قيم الصلابة للمعادن من الأقل صلابة عند 5 كجم/مم2 إلى المعادن الصلبة جدا بمقدار 1500 كجم/مم2.

3-5-4 مقياس روكويل للصلادة:

يستعمل مقياس روكويل مخروط بزاوية 120 درجة مثبت على رأسه كرة من الحديد لها قطر 1/8 أو 1/16 بوصة كأذات للنقر ويتم قياس عمق النقر في المعدن بعد تسليط وزن قدره 60 أو 100 أو 150 كجم ويقاس العمق آليا .

وتكون نتيجة القياس عبارة عن رقم وحرف فمثلا:

المواد الصلدة جداً تقدر على مقياس (C) وتقاس ما بين RC 20 و RC 70

والمواد الأقل صلادة تكون على مقياس B أو A

4-5-4 الصلادة المجهرية (Microhardness):

تمتاز طريقة قياس الصلادة المجهرية بخصوصيتها لقياس الصلادة على سطح صغير جداً من المادة، أي تحت المجهر، وكذلك إمكانية التركيز على طور معين على سطح المادة أو المعدن كما بالشكل(4−12) ، ويستعمل لذلك هرم ماسي رباعي نسبة القطر الكبير إلى الصغير يساوى 7 إلى 1 وثقل مقداره 25 كجم، ويتم إيجاد قيمة الصلادة من قياس الطول الأكبر في المعين الناتج عن أثر الهرم في العينة، ثم التعويض في معادلة نوب للصلادة المجهرية.

$$KHN = \frac{P}{A_p} = \frac{P}{l^2 C} = \frac{14.2P}{l^2} \qquad (22-4)$$

عندما يكون:

KHN: الصلادة المجهرية أو صلادة نوب (Knoop Hardness)

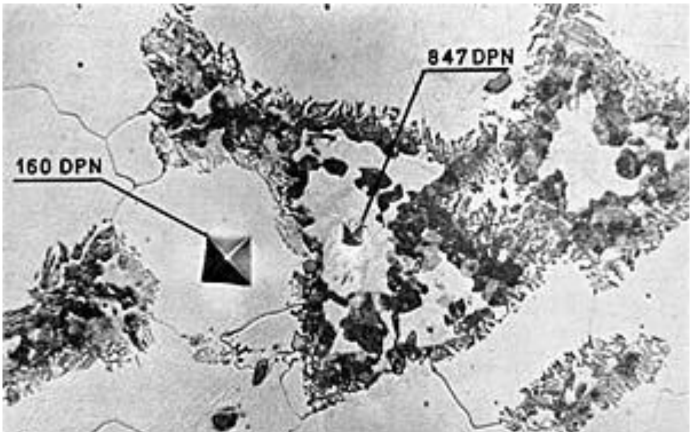
P: الثقل بالكيلوجرام

Ap: مساحة أثر النقر بالمليمترات المربعة .

l: طول القطر الأكبر في قاعدة الهرم مم.

C: ثابت لنوع الهرم يحدده المصنع.

ورغم أن هذه الطريقة دقيقة جداً في إختبارات الأماكن التي يمكن قياس الصلادة لها فان العينات تحتاج إلى تحضير جيد قبل إستعمالها .



شكل(4−12) تغير قيمة الصلادة المجهرية حسب نوع الطور.

أسئلة الفصل الرابع

1. عرف كل من المفاهيم الآتية:
   ا. الصلابة.
   ب. الصلادة.
   ج. الصلادة المجهرية.
2. قارن بين الإجهاد والإنفعال الهندسي والإجهاد والإنفعال الحقيقي لعينة على شكل سلك معدني تعرض لوزن قدره 2500 كجم، علماً بأن قطر السلك قبل التحميل يساوي 1.25 سم وقطره بعد التحميل يساوي 1 سم.
3. أرسم منحنى الإجهاد والإنفعال للمواد المطيلة وللمواد الهشة، مبينا نقطة الخضوع وأقصى قيمة للإجهاد وإجهاد الإنهيار.
4. أوجد الإجهاد والإنفعال الهندسي والحقيقي لصفيحة من معدن الألومنيوم 1010 ، إذا كان سمكها قبل التحميل يساوي 2 مم وعرضها يساوي 2سم وسمكها بعد التحميل يساوي 1مم وعرضها يساوي 1.5 سم، علما بأن قوة التحميل تساوي 15 ميجاباسكال.
5. سلك دائري من الصلب الكربوني نوع 1030 تم تحميله حتى الإنهيار، فإذا كان قطر السلك قبل التحميل يساوي 2.1 مم وبعد التحميل يساوي 0.8 مم. أوجد نسبة النقص في المساحة.
6. وضح مع الرسم طريقة قياس الصلادة لبرينل مع بيان أذات النقر وكيفية حساب عدد برينل.
7. قارن بين طريقتي برينل وروكويل لقياس الصلادة.
8. رتب المعادن والسبائك الآتية من الأقل إلى الأعلى صلادة:

الصلب عالي الكربون، معدن الألومنيوم النقي، حديد الزهر الأبيض، الصلب منخفض الكربون.

9. أوجد الشغل المبذول لكل وحدة حجم وكذلك الإنفعال الهندسي لعينة من النحاس في حالة شد بإجهاد قدره 150 ميجاباسكال، إذا كان معامل المرونة يساوي 110 جيجاباسكال، وأن الإجهاد كان في منطقة المرونة.

10. وضح مع الرسم خطوات قياس الصلابة النسبية للمواد بطريقة الصدم.

11. عند تصميم خزان عالي الضغط مصنوع من سبيكة ألومنيوم (2024-T6) تحتوي على (4.5%) نحاس، وجد أنها عند تعرضها لإجهاد قدره 350 ميجاباسكال، كان معامل شدة الإجهاد الحرج يساوي 24.2 ميجاباسكال م$^{0.5}$. أوجد أكبر كسر داخلي يمكن أن يتحمله هيكل الخزان قبل الإنهيار، علماً بأن الثابت ألفا يساوي الواحد الصحيح.

الفصل الخامس

المعالجة الحرارية للصلب الكربوني

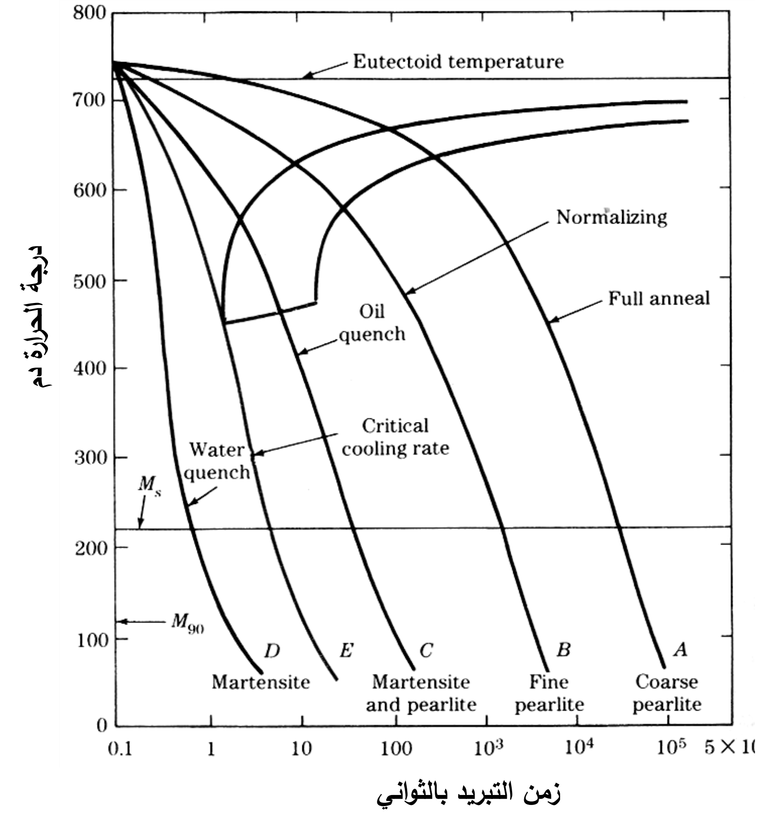
المعالجة الحرارية هي عبارة عن عمليات التسخين والتبريد للمعدن أو السبيكة بتوقيتات معينة للحصول على خصائص مطلوبة. فبالنسبة للحديد تتضمن معظم عمليات المعالجة الحرارية للصلب الكربوني تحويل أو إنحلال طور الاستينيت (Austenite).

ومن الملاحظ أَن معدل التسخين لا يؤثر كثيراً في مكونات السبيكة عدا الصفائح الرقيقة السمك والتي يراعى عند معالجتها التسخين البطئ، في حين أن معدل التبريد له تأثير مباشر على خصائص المعدن وله أهمية كبيرة في إكساب السبائك خواص ميكانيكية معينة.

5- 1 تأثير معدل التبريد علي البنية الداخلية للصلب الكربوني:

يوضح الشكل(5- 1) تأثير معدلات التبريد المختلفة علي البنية الداخلية لعينات من الصلب الكربوني الذي يحتوي على 0.8 % كربون (Perlite)، حيث تم تسخينها إلى منطقة الاستنيت (40 دم أعلى من نقطة إيوتيكتويد) ثم بردت بمعدلات تبريد مختلفة؛ ففي الحالة (A) كان التبريد بطيئا أي أن العينة قد بقيت في الفرن لتبرد وقد أقفل تشغيله، والذي سياخذ ساعات طوال تصل إلى ثمانية ساعات أو أكثر في بعض الأحيان، وتكون البنية الداخلية عبارة عن برليت كما بالشكل(5–3) و (5–4) وهذا ما يعرف بالتلدين الكامل ويصبح المعدن طريا قليل الصلادة، وترجع خشونة البرليت للصلب عالي الكربون إلى نمو الحبيبات (grain growth) بسبب تواجدها عند درجة حرارة عالية لفترة طويلة من الزمن.

وعندما تترك العينة لتبرد في الهواء الجوي كما في العينة (B) فإن التبريد يكون أسرع والبنية الداخلية تتكون من برليت ناعم وهو ما يعرف بالتسوية، ويكون الصلب الكربوني في هذه الحالة أكبر صلادة وصلابة من حالة التلدين الكامل.



شكل (5 - 1) تأثير معدل التبريد على التركيب المجهري للصلب الكربوني.

أما التبريد الأسرع من ذلك كما في الحالة (C) والذي يتضمن غمر العينة مباشرة في الزيت بعد تسخينها في الفرن أو غمر العينة في الماء كما في الحالة (D) فان البنية الداخلية للسبيكة تكون في معظمها من المارتنسيت والبرليت في حالة الزيت والمارتنسيت فقط في حالة الماء، وهذه العمليات الأخيرة تعرف بعمليات التقسية

ويكتسب المعدن بالتبريد السريع صلادة عالية، إلا أنه يكون هشا في معظم الأحيان نتيجة لتكوين الإجهادات الحرارية بالمعدن.

ويلاحظ أن الماء أكثر قدرة على التبريد السريع ثم الزيت ثم الهواء، إلا أنه من الناحية العملية يفضل التبريد في الزيت أو الهواء السريع عن التقسية بالماء لان الأخير كثيراً ما يتسبب في ظهور تشققات على سطح العينات بعد التقسية نتيجة للاجهادات الحرارية الكبيرة الناتجة عن سرعة التبريد.

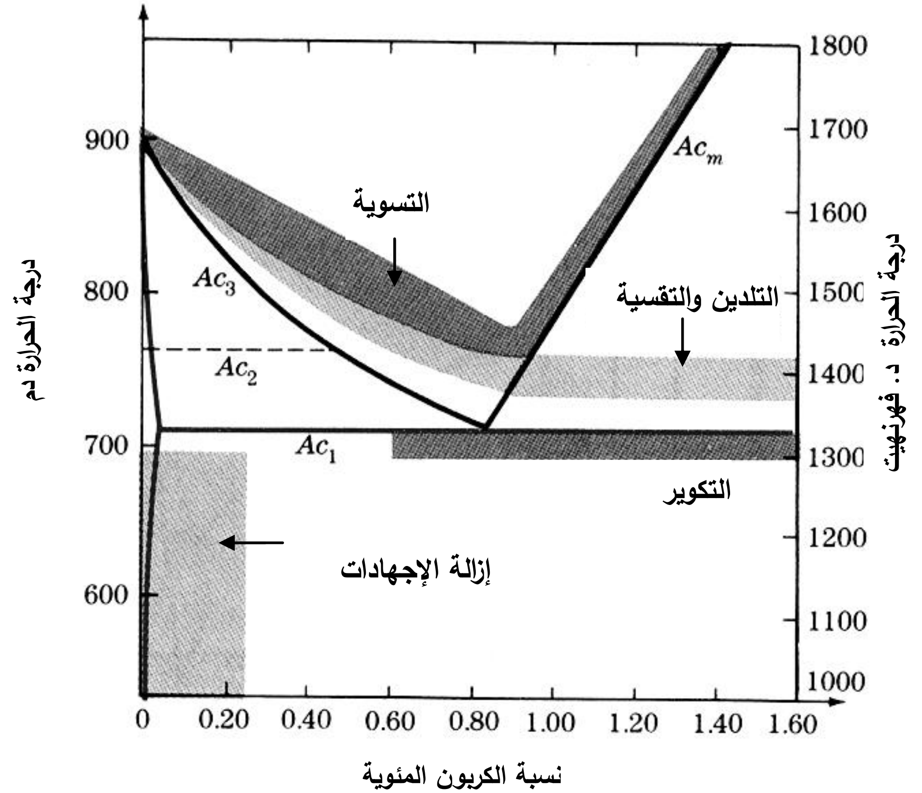
5- 2 طرق المعالجة الحرارية للصلب الكربوني:

تعتمد طرق المعالجة الحرارية لمشغولات الصلب الكربوني على نوعية الخواص الميكانيكية المطلوبة، ومن الملاحظ أن التبريد تؤثر في الخواص الميكانيكية للمعدن بأكمله، وفيما يأتي أهم الطرق المستخدمة في المعالجة حرارية.

5-2-1 التلدين الكامل: (Full Annealing)

التلدين الكامل عبارة عن عملية تسخين المعدن أو السبيكة إلى درجة معينة (بالنسبة للحديد 20 درجة مئوية فوق خط Ac3) ثم التبريد البطئ بعد ذلك في داخل الفرن أو في مادة عازلة للحرارة إلى درجة الحرارة العادية والشكل (5−2) يبين منطقة التلدين للصلب الكربوني.

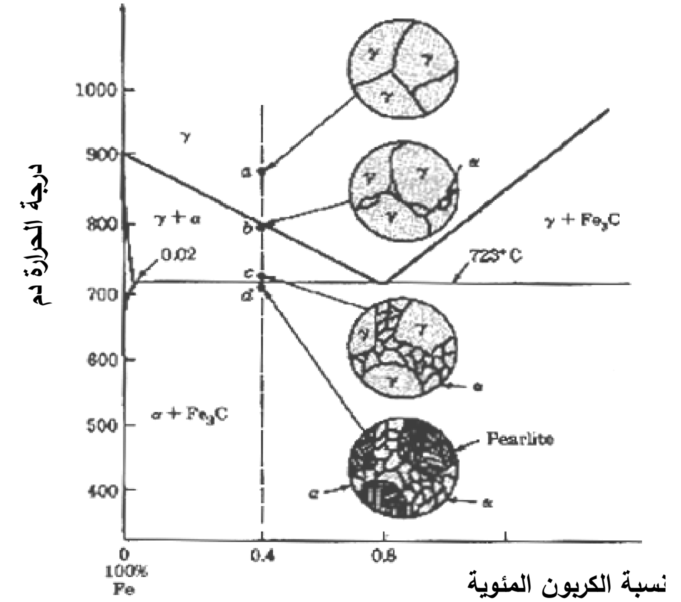
والغرض من التلدين هو الحصول على معدن مطيل (قابل للسحب والطرق) وكذلك التحسين من الخواص المغناطيسية والكهربية وتحسين التشغيل على الألآت (Improve Machinability) . ويلاحظ أن التسخين إلى درجة حرارة أعلى من منطقة التلدين كما في مخطط طور الحديد والكربون يعمل على ظهور بلورات كبيرة من الاستينيت ، عند التبريد تتحول إلى بلورات كبيرة من (كربيد الحديد والفيريت) (Pearlite) وهذه تكون لها خصائص ميكانيكية ضعيفة .



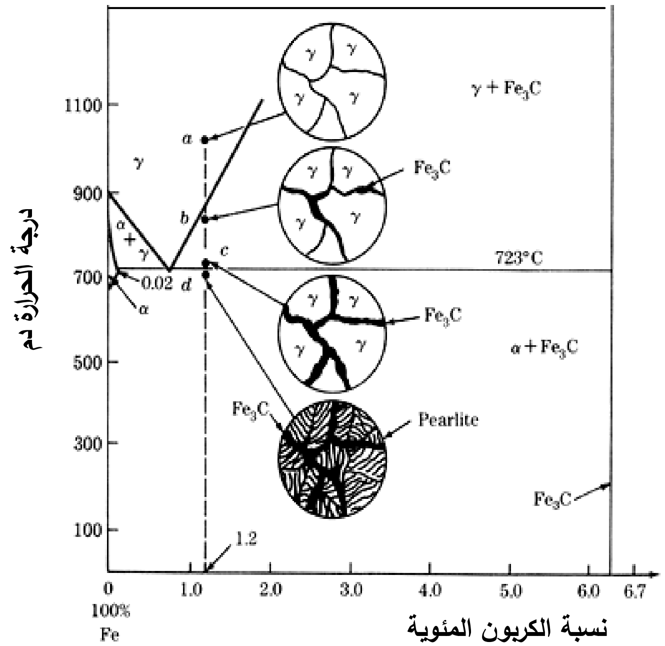
شكل (5- 2) مناطق المعالجة الحرارية للصلب الكربوني.

فمثلا تلدين عينة تحتوي على 0.4 % كربون عند 900 دم تتحول العينة من أوستينيت (γ) إلى مارتينسيت والقليل من الفيريت وأخيرا إلى بيرليت وفيريت عند درجة حرارة أقل من 723 دم كما بالشكل(5- 3).

أما تلدين الحديد المحتوي على 0.8 % كربون أو أكثر من ذلك فإنه يعطي دائما حبيبات (grains) كبيرة من البيرليت يتواجد بينها كربيد الحديد كما بالشكل (5 - 4) وهذا المزيج يعطي الحديد خصائص هشة أي قابل للتقصف مع صعوبة عند التشغيل على الالات .



شكل (5 - 3) تغير البنية الداخلية للصلب 0.4 % كربون بفعل التلدين.



شكل (5 - 4) تغير البنية الداخلية للصلب 1 % كربون بفعل التلدين.

5 -2-2 التكوير(Spheroidizing):

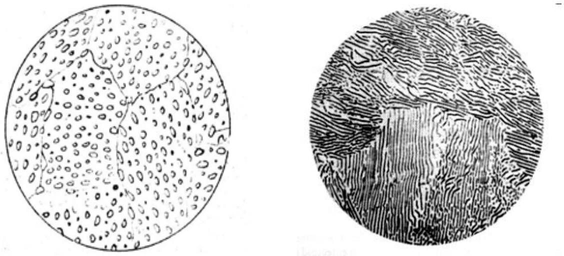
عند تلدين الحديد المحتوي على أكثر من 0.8 % كربون، ينتج كربيد الحديد على شكل صفائح قاسية جداً وهشة (Brittle) ونسبة الاستطالة به لا تزيد عن 5% ويعرف بالسيمنتيت، وبذلك يكون من الصعوبة تشكيله أو تشغيله على الالات، وتعالج هذه السبيكة حراريا لتحويل كربيد الحديد إلى كرايات صغيرة في وسط من الفيريت اللين بواحدة من الطرق الآتية :

1- تسخين السبيكة لمدة طويلة من 6 إلى 12 ساعة عند درجة حرارة أقل بقليل من 723 درجة مئوية.

2- التسخين والتبريد دوريا فوق وتحت خط 723 درجة مئوية لعدة مرات.

3- التسخين إلى درجة أعلى من 723 درجة مئوية؛ أي عند 843 درجة مئوية مثلا، ثم التبريد بسرعة إلى 704 درجة وتترك السبيكة لفترة عند هذه الدرجة وبعد ذلك تبرد إلى درجة الحرارة العادية.

وبأي من الطرق الثلاثة السابقة يتحول كربيد الحديد الصفائحي إلى كرات داخل الفيريت كما بالشكل (5 - 5)، وتمتاز هذه البنية بليونة و مطيلية مناسبة مع إنخفاض في الصلابة. ويلاحظ أن الصلب منخفض الكربون لا تعمل له عملية التكوير لأنها تجعله طريا جداً.



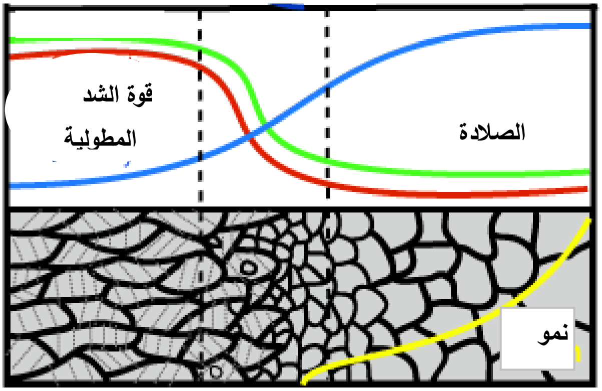
قبل التكوير **بعد التكوير**

شكل (5 - 5) تأثير عملية التكوير الصلب الكربوني عند نقطة(إ1.1 % كربون).

5- 2- 3 التطبيع (Tempering):

التطبيع يسمى كذلك إزالة الاجهاد بالتلدين (Stress relief annealing) وهذه العملية عادة ما تعمل بعد القيام بالتشغيل على البارد (Cold working) لإزالة الإجهادات الداخلية الناتجة عن التشكيل ويكون بالتسخين إلى درجة حرارة من 550 إلى 723 درجة مئوية لقطع الحديد السميكة، وما بين 200 – 700 درجة مئوية بالنسبة للصفائح الرقيقة والأسياخ (Sheets and wires)، يتم التسخين ببطء شديد حتى لا يحصل أي تشوه لشكل المعدن ويستغرق زمن التطبيع ما بين 10 دقائق وساعتان حسب سمك المعدن وتركيبه، والشكل (5 - 2) السابق يبين منطقة إزالة الإجهادات للصلب الكربوني.

ويلاحظ أن المعدن المقام عليه تشكيل على البارد مثل الدرفلة أو السحب يكون ذو صلادة وقوة شد عالية مع وجود إجهادات داخلية كبيرة، وتكون حبيبات المعدن على شكل إبري أو مغزلي متراصة، وعندما يقام عليه تطبيع تزال هذه الإجهادات فتزيد المطيلية وتقل مقاومة الشد والصلادة وتنمو الحبيبات كما في الشكل(5–6).



شكل(5–6) تأثير المعالجة الحرارية على بلورات الصلب الكربوني.

5- 4-2 **التسوية** (Normalizing):

التسوية عبارة عن عملية تسخين الصلب الكربوني إلى 35 درجة مئوية أعلى من الدرجة الحرجة (Ac3-Acm) ثم التبريد بعد ذلك في الهواء الجوي إلى درجة الحرارة العادية.

والغرض من التسوية هو إنتاج نوعيات من الصلب لها صلابة وقوة شد عالية أي أكبر من الحديد المقام عليه عملية المعالجة بالتلدين، وبالنسبة للصلب العالي الكربون فإن هذه الطريقة تجعل الوسط متجانسا كما تساعد على تحسين التشغيل على الألآت .

ومن مقارنة التلدين بالتسوية نجد أن هناك فرق في سرعة التبريد وفي منطقة التسخين، إلا أن ألية عمل الطريقتين واحدة رغم إختلاف كمية ومعدل تحول الأستينيت إلى الفيريت والسيمنتيت، وهي كما يأتي :

عند تبريد الاستينيت (Austenite) ببطء أو تبريد متوسط في الهواء الجوي يكون لذرات الكربون زمن للانتشار (Diffusion) خارج الأستينيت ذو البلورات السطحية (FCC) سانحة المجال للحديد ليتحول إلى بلورات وسطية (BCC) وتعتمد نسبة التحول في هذه العملية على سرعة التبريد.

5 -5-2 **التقسية** (Hardening):

مع زيادة سرعة التبريد عن الطرق السابقة لن يكون هناك وقت للكربون لينتشر ويخرج من بلورات الأستينيت، رغم أن هناك بعض الحركة لبلورات الحديد ولكن لن تجد الزمن الكافي لتتحول إلى ذرات وسطية ويبقى الكربون محصوراً داخل بلورة الحديد وهذا المحلول من الحديد والكربون يسمى مرتينسيت (Martensite).

يتكون المارتينسيت من محلول جامد مشبع من الحديد والكربون، وله شكل بلوري رباعي ذو ضلعان متساويان، والضلعان الآخران أكثر إستطالة نتيجة لوجود ذرات الكربون، وهو السبب الأساسي وراء شدة صلابة المرتينسيت.

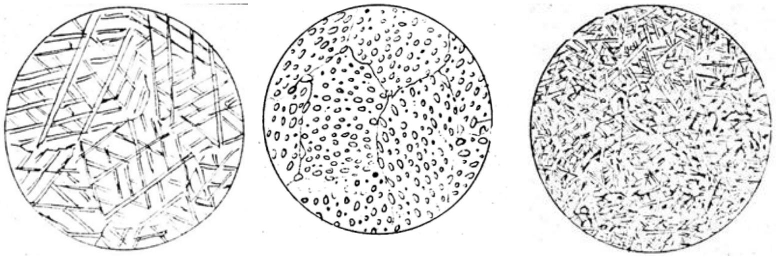
ويظهر المارتينسيت تحت المجهر على شكل إبري رقيق أبيض أو دائري، وهي صفائح شديدة الصلابة وهشة، ولذلك فان المارتنسيت عادة ما يحتاج إلى إزالة الإجهادات لزيادة الصلابة وتخفيض الصلادة، ويتم ذلك بالتسخين إما إلى درجة حرارة ما بين 200 و300 دم ويكون التركيب المجهري عبارة عن صفائح رقيقة من مارتنسيت ناعم داخل الفيريت، أو التسخين إلى ما بين 400 و 700 دم ثم التبريد السريع ليعطي بنية داخلية تتكون من كرات صغيرة تسمى بالمارتينسيت الكروي، وهذه البنية أقل صلادة من النوع الصفائحي .

أما في حالة تسخين المعدن إلى درجة حرارة أعلى من المنطقة المحددة للتقسية في الاستينيت فإن التركيب المجهري يكون مارتينسيت خشن أي يحتوي على صفائح كبيرة خشنة قاسية وهشة كما بالشكل (5−7).

وفي السنوات الأخيرة وجد أن الكثير من السبائك تحدو حدوا تكوين المارتينسيت في الحديد ومن هذه السبائك : الحديد والنيكل ، النحاس والخارصين، والنحاس والألومنيوم. ومن مشاكل المارتينسيت وجود الإجهادات الداخلية والهشاشة أو التقصف (Brittle) وهذا يمكن تلافيه بالتطبيع .

مرتينسيت (γ) (عند 360−650 دم) $\leftarrow$ فيريت (α)+ كربيد الحديد

والناتج بعد التطبيع محلول جامد من الفيريت الأقل صلابة مع كربيد الحديد وهذا الطور يمتاز بقوة شد وصلابة عالية مع إنخفاض الصلادة أي أقل قابلية للتقصف والكسر.



مارتينسيت ناعم   مارتينسيت كروي   مارتينسيت خشن

شكل (5 - 7) يوضح الفرق بين حالات المارتينسيت.

مثال:

ماهي المعالجات الحرارية المطلوبة لصناعة قلم تجليخ من صفيحة من معدن الحديد رقم 1080 ذو صلادة 370 على مقياس برينل.

الحل

صفيحة الحديد رقم 1080 تحتوي علي 0.8 % كربون تسخين(780 دم) ← اوستينيت (γ)
الصلادة 370 BHN (صلد وصعب التشغيل)

← ألتلدين ساعة في الفرن ← بيرليت ($\alpha+Fe_3C$) تبريد في الهواء← بيرليت خشن)
عند درجة 677 دم (BHN 250)

← تصنيع القلم تسخين لنصف ساعة← أوستينيت (γ) غمس في الزيت ← مرتينسيت
عند درجة 815 دم أو هواء بارد هش (BHN680)

← تسخين إلى (550 دم) تم تبريد في الهواء الي الدرجة العادية – قلم تجليخ باقل صلادة (تطبيع) وأكثر صلابة.

3-5 المعالجة الحرارية السطحية للصلب الكربوني:

إن العديد من التطبيقات الهندسية الصناعية تحتاج إلى سطح ذو صلادة عالية مما يجعله مقاوما جيداً للاحتكاك ومعدن داخلي لين نسبيا ذو صلابة عالية لتحمل الصدمات وهذا يمكن تحقيقه بإحدى طرق المعالجة السطحية للصلب الكربوني والذي ينطبق كذلك على الصلب السبائكي. أما السبائك غير الحديدية فإنه قلما تستعمل هذه الطرق لتقسيتها.

1-3-5 الكربنة (Carburizing):

تتم عملية الكربنة بعد الانتهاء من عمليات التشكيل والقطع المطلوبة حيت تكون السبيكة أقل صلادة، وبعد ذلك تنظف الشغلة جيداً ثم تعالج حراريا بطريقة الكربنة، وتستعمل الكربنة للصلب المنخفض الكربون الذي يحتوي على 0.1 إلى 0.25 % كربون، أما الصلب العالي الكربون فإنه لا يحتاج إلى كربنة.

وتتلخص الطريقة في تسخين المعدن إلى درجة حرارة من 900 إلى 930 دم (أي إلى منطقة الاستينيت) ويكون معرضاً إلى وسط يحتوي على تركيزات عالية من الكربون، ويمكن أن يكون الوسط الكربوني صلباً أو غازياً أو سائلاً. وتستعمل الكربنة كثيراً لتصليد أسطح التروس ومحاور نقل الحركة وقوالب التشكيل للمعادن وغيرها.

1- الكربنة في الوسط الصلب (Pack Carburizing):

تعتبر الكربنة في الوسط الصلب من أقدم طرق التقسية السطحية، ويتم ذلك بغمر الشغلة في إناء مقفل يحتوي على فحم ناعم مضاف إليه ما نسبته 20 % كربونات الباريوم كمنشط للتفاعل، وهذا الإناء أو العلبة يجب أن تكون مقاومة للحرارة العالية ولذلك تصنع من صلب الكروم والنيكل (30 % كروم و 20 % نيكل) ثم تقفل العلبة

ويستعمل لعزل محتوياتها زجاج ينصهر على حوافها أو بإستعمال الطين على حواف الغطاء.

تسخن العلبة في فرن حتى 925 دم لفترة من الزمن تتراوح من 5 إلى 20 ساعة وذلك يعتمد على مدى إنتشار الكربون بداخل الصلب الكربوني فكلما إستغرق الزمن أكثر كلما كان إنتشار الكربون أعمق بداخل المعدن الذي يتم تصليده. وتخضع عملية الكربنة إلى التفاعلات الآتية:

أ– تحلل كربونات الباريوم:

$$BaCO_3 \longrightarrow BaO + CO_2 \qquad (1\text{-}5)$$

ب - تفاعل أول أكسيد الكربون مع سطح المعدن:

$$2CO + Fe \longrightarrow Fe(C) + CO_2 \qquad (2\text{-}5)$$

ج - إنتشار الكربون بداخل المعدن وتفاعل ثاني أكسيد الكربون المنبعث مع الفحم لإنتاج كميات كبيرة من أول أكسيد الكربون الذي يتفاعل مع المعدن وهكذا تتكرر خطوات التفاعل.

$$CO_2 + C \longrightarrow 2\,CO \qquad (3\text{-}5)$$

2- الكربنة في الوسط الغازي (Gas Carburizing):

تتم عملية الكربنة في الوسط الغازي بوضع القطعة المعدنية في فرن يحتوي على غاز الميثان أو أي غاز هيدروكربوني (C_1 إلى C_5) عند درجة حرارة 925 دم وقد تضاف غازات أخرى مثل النيتروجين أو أول أكسيد الكربون.

$$CH_4 + 3/2\, O_2 \longrightarrow CO + 2\, H_2O \qquad (4\text{-}5)$$

$$Fe + CO_2 \longrightarrow Fe\,(C) + CO_2 \qquad (5\text{-}5)$$

ا- معدل إنتشار الكربون:

يعتمد معدل إنتشار الكربون بداخل الحديد على معامل الإنتشار للكربون (Diffusion Coefficient) ومقدار الفرق في تركيز الكربون عند السطح وبداخل المعدن، ويمكن حساب تركيز الكربون عند أي مسافة بداخل المعدن بتطبيق قانون فيكس (Ficks low).

ويتناول قانون فيكس العلاقة بين تركيز المواد ومعدل إنتشارها من نقطة إلى أخرى، وفي هذه الحالة يكون الفرق في تركيز الكربون بين سطح المعدن وجوفه الدافع إلى تغلغل الكربون بداخل المعدن على مسافة معينة مع مرور الزمن.

القانون الأول لفيكس:

يبين قانون فيكس الأول الشكل التفاضلي للمعدلة وهي كما يأتي:

$$\frac{dC_x}{dt} = \frac{d}{dx}\left(D\frac{dC_x}{dx}\right) \qquad (1-5)$$

القانون الثاني لفيكس:

يمكن حل المعادلة التفاضلية السابقة بعدة طرق أبسطها بإستعمال التحليل العددي وذلك بمساعدة دالة حساب نسبة الخطاء للحصول على قانون فيكس الثاني كما في المعادلة الآتية:

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \qquad (2-5)$$

عندما يكون:

C_S: تركيز الكربون عند سطح المعدن.

C_0: التركيز الابتدائي للكربون في المعدن.

C_x: تركيز الكربون عند مسافة x من سطح المعدن.

X: بعد المسافة عن سطح المعدن.

D: معامل إنتشار الكربون بداخل الحديد.

t : زمن الإنتشار.

erf : دالة حساب نسبة الخطاء، لها قيم وطريقة حساب كما بالجداول (-5 1). ويلاحظ أن إنتشار ذرات الكربون بين ذرات الحديد يتم بالتغلغل كما سبق دراسته بالفصل الثاني.

جدول (5- 1) قيم دالة حساب نسبة الخطاء.

z	erf z	z	erf z	z	erf z	z	erf z
0	0	0.40	0.4284	0.85	0.7707	1.6	0.9763
0.025	0.0282	0.45	0.4755	0.90	0.7970	1.7	0.9838
0.05	0.0564	0.50	0.5205	0.95	0.8209	1.8	0.9891
0.10	0.1125	0.55	0.5633	1.0	0.8427	1.9	0.9928
0.15	0.1680	0.60	0.6039	1.1	0.8802	2.0	0.9953
0.20	0.2227	0.65	0.6420	1.2	0.9103	2.2	0.9981
0.25	0.2763	0.70	0.6778	1.3	0.9340	2.4	0.9993
0.30	0.3286	0.75	0.7112	1.4	0.9523	2.6	0.9998
0.35	0.3794	0.80	0.7421	1.5	0.9661	2.8	0.9999

مثال:

عند القيام بالتقسية السطحية لترس مصنوع من الصلب الكربوني 1020 عند درجة حرارة 927 دم كان تركيز الكربون عند سطح المعدن يساوي 0.9 %. أوجد الزمن المطلوب لزيادة تركيز الكربون إلى 0.4 % عند مسافة 0.5 مم من سطح المعدن، علما بأن معامل الإنتشار للكربون يساوي $1.28X10^{-11}$ م^2/ث.

الحل

بلإشارة إلى التصنيف الدولي للصلب الكربوني فإن السبيكة 1020 تحتوي على 0.2 % وبذلك فإن:

Alloy 1020 ⟶ $C_o = 0.2\%$ C

$C_s = 0.9\%$ C

X = 0.5 mm $D_{927} = 1.28X10^{-11}\ m^2/sec$

$C_x = 0.4\%$ C

وبالتعويض في قانون فيكس الثاني:

$$\because \quad \frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = erf\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

$$\frac{0.5}{0.7} = erf\left\{\frac{69.88}{\sqrt{t}}\right\} = 0.7143$$

ويمكن إيجاد قيمة z المجهولة والمناظرة للدالة erf(z) بإستخدام القيم المتوفرة بالجدول(5- 1) وهي كما يأتي:

$$\frac{0.7143 - 0.7112}{\mathbf{0.7421 - 0.7112}} = \frac{X - 0.75}{\mathbf{0.8 - 0.75}} \longrightarrow X = 0.755$$

erf(z)	z
0.7112	0.75
0.7143	X
0.7421	0.8

$$\mathbf{z = \frac{69.88}{\sqrt{t}} = 0.755} \longrightarrow$$

t = 8567 sec = 143 min

5-3- 2 النتردة (Nitriding):

تتشابه عملية النتردة كثيراً مع الكربنة وتستعمل للحصول على سطح ذو صلادة عالية ومعدن داخلي لين، وتتم عملية التقسية السطحية بتسخين المعدن إلى درجة 500 – 580 دم في وجود النيتروجين على شكل ذرات نيتروجين (ولا تستعمل

جزيئات النيتروجين لأنها لا تدخل في المعدن) أو عن طريق حقن غاز الامونيا في الفرن بحيث تتكسر روابط الأمونيا بالحرارة وينتج عنها ذرات نيتروجين.

وتستعمل النتردة عادة للصلب المحتوي على الالومنيوم أو الكروم أو الموليبدنيوم حيث أن هذه العناصر لها قابلية لتكوين مركبات مع النيتروجين .

ومن مميزات النتردة الحصول على سطح نظيف صلد مقاوم لدرجات الحرارة العالية ومقاوم جداً للإحتكاك، وتمتاز كذلك بأن النيتروجين لا يخرج من المعدن عند درجات الحرارة العالية كما في الكربنة. ومن عيوبها أن زمن التسخين طويل قد يصل من 20 إلى 60 ساعة وبذلك تكون هذه الطريقة عالية التكاليف، وحيث أن النتردة تقام عند درجة أقل من 723 دم فإنها عادة ما تتم بعد إجراء العمليات الأخرى مثل تقسية المعدن وإزالة الإجهادات الداخلية منه.

5- 3- 3 الكرمنة (Chromizing):

يستعمل مسحوق الكروم مع إضافات أخرى (60 % كروم ، 0.2 % يوديد الأمونيوم، 39 % كاولينا) لتصليد سطح مشغولات الصلب الكربوني وصلب العدد، ويتم ذلك بتسخين القطعة المغمورة في المسحوق السابق عند درجة حرارة من 900 إلى 1200 دم لفترة طويلة تصل إلى 12 ساعة، وبذلك يتكون كربيدات الكروم الشديدة الصلادة. وتمتاز طبقة الكروم بمقاومتها للإحتكاك عند درجات الحرارة العالية.

5 -3 - 4 التصليد بالبورون (Boronizing):

حيث أن البرون له ذرة صغيرة مثله مثل الكربون والنيتروجين فإنه قد أستخدم بطريقتين لتصليد المعادن وخاصة الصلب الكربوني وصلب العدد؛ الأولى عن طريق غمر الشغلة في كربيد البرون مع مواد منشطة أخرى عند درجة حرارة 900 إلى

1000 دم لتكوين (Fe_2B & FeB) وهذه مركبات قاسية وشديدة الصلادة حيث تتجاوز صلادتها (1500 VHN)

والطريقة الثانية تتمثل في وضع القطعة في وسط به ملح البوراكس (بورون الصوديوم) مع مساحيق المعادن التي لها القدرة على تكوين الكربيدات مثل الفاناديوم أو الكروم أو الموليبدنيوم أو التنجستون ثم تسخينها عند درجة حرارة 1050 دم. ويمكن بهذه الطريقة الحصول على أسطح شديدة الصلادة أي قد تتجاوز 3000 VHN وتعرف هذه الطريق ب(Toyota diffusion process).

5- 3 -5 التصليد باللهب (Flame hardening):

يعتبر التصليد باللهب من الطرق البسيطة التي تعتمد على تحويل الفيريت والبيرليت اللين إلى طور الاستينيت الصلد وهذا يحدث عند السطح في حين أن داخل المعدن لا يتأثر بالمعالجة، ومن مزايا عملية التصليد باللهب أنها يمكن القيام بها في موقع العمل وخاصة للقطع الكبيرة أو المعقدة التي لا تكون مناسبة للتسخين في الأفران مثل التروس الكبيرة أو محاور نقل الحركة الطويلة وكذلك بعض أعمدة الكامات المعقدة، ومن ميزاتها كذلك أنه يمكن تصليد جزء من الشغلة مثل تصليد الجزء الذي يتعرض للإحتكاك.

وتتم عملية التصليد بتسخين سطح المعدن بإستعمال لهب الأكسي أستيلين، يلي ذلك التبريد السريع في الماء، وحيث أن هذه العملية ينتج عنها إجهادات كبيرة فإن الخطوة التالية تتمثل في التطبيع عند درجة حرارة من 180 إلى 200 دم لفترة من الزمن تعتمد على سمك الشغلة وذلك لإزالة الإجهادات الحرارية. وتستعمل عملية التصليد عادة للصلب الكربوني الذي يحتوي على 0.3 إلى 0.6 % كربون، أما

الصلب العالي الكربون فلا تقام عليه عملية التصليد لأنه يكون معرضا للكسر بسبب التبريد السريع.

5-3-6 التصليد بالحث (Induction hardening):

يستعمل التصليد بالحث لزيادة صلادة المعادن موضعيا أو لجميع سطح الشغلة، والجدير بالذكر أن التسخين يحدث للسطح الخارجي فقط مما لا يؤثر على الصلابة والمطيلية للمعدن، ويستخدم التصليد بالحث كثيراً للقطع التي تتعرض للاحتكاك مثل عمود الكامات وعمود المرفق وكذلك التروس وبعض العدد.

ويتم التصليد عن طريق وضع الشغلة في مجال مغناطيسي ناتج عن ملف متصل بتيار متردد، ويستعمل لذلك مولد كهربائي عالي التردد كما بالشكل (5−8). وبذلك فان المجال المغناطيسي كفيل بإنتاج حرارة عالية على سطح المعدن وتحويل الفيريت و البيرليت أو كربيد الحديد إلى مارتينسيت (أي إلى درجة حرارة تقارب 760 دم للصلب الكربوني و 800 دم لصلب العدد) ويتم بعد ذلك التبريد السريع في الماء للحصول على مارتينسيت شديد الصلادة.

ويعتمد عمق التصليد على زمن التسخين وعادة ما يكون لبضع ثوان، وكذلك على مقدار ذبذبة التيار الكهربي، ويمكن الحصول على عمق التصليد من المعادلة (5-4). ويمكن ضبط قدرة ألة التصليد وترددها للحصول على عمق التصليد المناسب كما بالجدول(5-2).

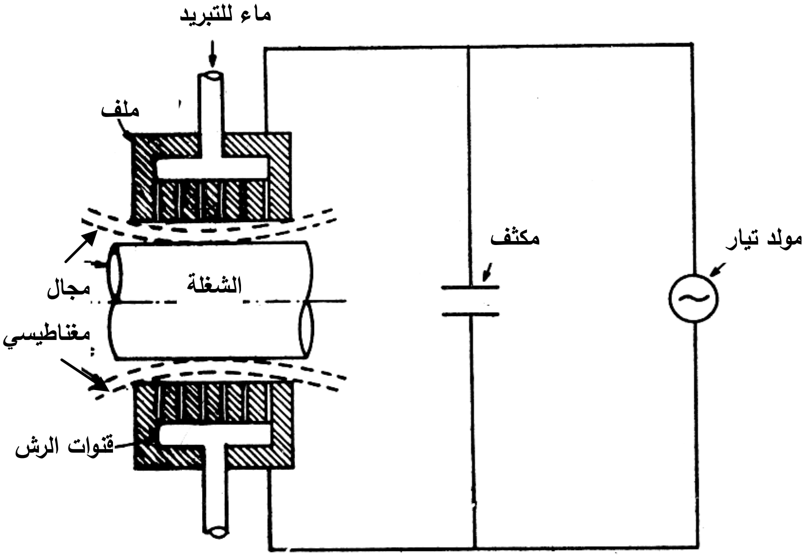
$$(d_o)_{800} = d_{800} + 0.2\sqrt{t} \qquad (5\text{-}3)$$

$$(d_o)_{800} = \frac{500}{\sqrt{f}} + 0.2\sqrt{t} \qquad (5\text{-}4)$$

حيث أن:

$(d_o)_{800}$: عمق التسخين بالمليمتر بفرض أن المعدن يتم تسخينه إلى 800 دم.

t : زمن التسخين بالثواني.   f: تردد التيار بالهيرتز.



شكل (5 -8) يوضح ألة التصليد بالحث.

الجدول (5- 2) يوضح عمق التسخين و ما يحتاجه من قدرة التيار و الذبذبة.

قدرة التيار (Kw)	التردد المطلوب (Hz)	مدى عمق التصليد (mm)
19 - 15	450	1.1 - 0.5
12 - 8	450	2.3 - 1.1
25 - 15	10	2.3 - 1.5
23 - 15	10	2.3 – 3.0
22 - 15	10	3.0 – 2.3
25 - 22	3	4.0 – 3.0
22 - 15	3	5.0 – 4.0

أسئلة الفصل الخامس

1. عرف كل من التلدين، والتقسية والتطبيع.
2. وضح تأثير التبريد بالهواء والزيت والماء على البنية الداخلية للصلب الكربوني المحتوي على 1.1 % كربون.
3. بين على مخطط إتزان الحديد والكربون مناطق التلدين والتقسية والتكوير للصلب الكربوني.
4. بين على مخطط إتزان الحديد والكربون مناطق التكوير والتطبيع للصلب عالي الكربون.
5. بين بالتفصيل طريقة عمل التلدين الكامل كمعالجة حرارية للصلب الكربوني المحتوي على 0.6 % و0.8 % كربون، مبيناً تأثير الكربون على البنية الداخلية وصلادة المعدن.
6. بين بالتفصيل عملية التقسية كمعالجة حرارية للصلب الكربوني المحتوي على 0.5 % كربون، مبيناً تأثير الكربون على البنية الداخلية وقوة الشد للمعدن.

الفصل السادس

سبائك المواد المعدنية

من التصنيفات التقليدية للسبائك المعدنية تقسيمها إلى مجموعتين رئيسيتين حديدية وغير حديدية كما ثم تفصيله في الفصل الأول من هذا الكتاب، وتعتبر السبائك الحديدية منخفضة التكاليف ولها خواص ميكانيكية جيدة مثل قوة الشد الكبيرة والصلابة العالية وغيرها، إلا أن الحاجة إلى سبائك المعادن الأخرى سببه الإحتياج إلى خواص أخرى غير قوة المعدن مثل تحمل درجات الحرارة العالية ومقاومة التآكل والكلال والاحتكاك، وكذلك تحسين الخواص الكهربية والمغناطيسية والضوئية وغيرها .

1.6 السبائك الحديدية:

في دراسة بأمريكا لمعرفة كمية إستهلاك الحديد والسبائك الأخرى سنويا وجد أن 85 % بالوزن من المجموع الكلي للمعادن والسبائك تصنع من السبائك الحديدية و 10% من سبائك الالومنيوم والماغيسيوم والنحاس والنيكل والباقي 5% تتضمن سبائك أكثر من 20 عنصراً، وهذه النسب تعبر عن أهمية السبائك الحديدية في الأعمال الهندسية .

1.1.6 حديد الزهر:

حديد الزهر هو مصطلح عام يطلق على العديد من سبائك الحديد والكربون، ويحتوي على 2 إلى 4 % كربون مضافا إليه 1 إلى 5 % سيليكون، وقد يكون بالسبيكة عناصر أخرى مثل الكروم أو المنجنيز أو النيكل لغرض الحصول على

خواص معينة، ولذلك فإن حديد الزهر متباين كثيراً من ناحية التركيب والخواص ومجالات الاستخدام.

ويعتبر حديد الزهر سهل الإنصهار ذو سيولة عالية وقليل التكاليف، ولذلك فإنه مناسبا لسباكة الكثير من المصبوبات المستخدمة في مجالات مختلفة مثل هياكل وقواعد ألآت الإنتاج والمعدات التي تحتاج إلى صلادة عالية ومقاومة جيدة لإجهادات الضغط. وينقسم حديد الزهر من ناحية التصنيع والخواص إلى عدة أنواع أهمها الزهر الأبيض والرمادي والمطيل والمطاوع.

أ- حديد الزهر الأبيض (White cast iron):

يسمى بالزهر الأبيض لأن كسره يظهر على شكل أبيض لامع خلافا للزهر الرمادي ، ويحتوي هذا النوع من الحديد على كميات كبيرة من كربيد الحديد (Fe_3C) في وسط من البيرليت كما بالشكل(6-1) ولذلك فإنه صلداً جداً، حيث تتجاوز صلادته 450 على مقياس برينل (BHN 450).

ويتركب حديد الزهر الأبيض من 0.5 إلى 2.3 % كربون و0.5 إلى1.5 % سليكون، بالإضافة إلى عناصر أخرى تضاف لتحسين خواصه. وينتج الزهر الأبيض من التبريد السريع لمصهور حديد الزهر، ويلاحظ أن نسبة الكربون والسليكون قليلة حتى يتم تكوين الكربيدات بالكامل دون وجود كربون حر على شكل جرافيت كما في الزهر الرمادي، وتتحول الأطوار في الزهر الأبيض كما يأتي :

$$\text{Liquid } (T > 1148\,^{o}C) \longrightarrow \gamma + Fe_3C$$

$$\gamma\ (1148\text{-}723\,^{o}C) \longrightarrow \gamma + Fe_3C$$

$$\gamma\ (T < 723\,^{o}C) \longrightarrow \text{perlite} + Fe_3C$$

ويلاحظ أن زيادة العناصر الثقيلة مثل 1−20 % كروم ، 1−4 % نيكل ، 2 % موليبدنيوم تزيد من الصلادة إلى (BHN 600)، ولذلك يعتبر حديد الزهر الأبيض شديد الصلادة وهش؛ أي له مقاومة كبيرة للاحتكاك وقوة شد ضعيفة، كما يتصف بصعوبة التشكيل والتشغيل على الألآت مثل القطع والثقب، ولذلك فإنه يستعمل في التطبيقات الهندسية التي تحتاج إلى صلادة عالية مثل صناعة الاسمنت والآت الطحن والآت التشكيل على البارد.

ب− حديد الزهر الرمادي (Gray cast iron):

يتكون حديد الزهر الرمادي من التبريد البطئ لمصهور حديد الزهر الذي يحتوي على تركيزات عالية من الكربون، وعند التبريد ينفصل الكربون الزائد عن تشبع الأستينيت، فيحدث إنفصال للكربون على شكل قشور من الجرافيت خارج كربيدات الحديد، وهذه الكربيدات قد تتحل بالحرارة إلى فيريت و بيرليت ويعتمد تركيز كل منهما على تركيز الكربون في حديد الزهر. ويوجد العديد من المركبات الأخرى الناتجة من الشوائب مثل كبريتيد الحديد وكبريتيد المنجنيز، والشكل(6-1) يوضح البنية الداخلية للزهر الرمادي عند تركيز 3.3 % كربون.

Liquid (T>1148 ^{o}C) $\longrightarrow$ γ + graphite

γ $\longrightarrow$ perlite + Fe_3C

perlite $\longrightarrow$ α + Fe_3C

ويحتوي الزهر الرمادي على 2.5 إلى 4 % كربون بالإضافة إلى 1 إلى 3 % سيليكون، وتتغير هذه النسب عند إضافة عناصر السباكة الأخرى للحصول على خواص معينة، مثل زيادة المطيلية أو مقاومة التآكل أو التحسين من التشغيل على

الألآت. ويعتبر الزهر الرمادي أقل صلادة من الزهر الأبيض ولذلك يمكن إجراء عمليات القطع والثقب عليه، إلا أنه لا يمكن درفلته أو سحبه على الألآت.

الاستعمالات:

يوجد لحديد الزهر الرمادي تركيبات متعددة مما وفر له مجالاً واسعاً للاستخدام، فمثلا برليت حديد الزهر الرمادي يستعمل لصناعة هياكل المحركات (Motor block) ويتركب من 3.2 % كربون و 2 % سليكون مع التبريد في الهواء، كما يستعمل الزهر الرمادي في صناعة عمود المرفق لمحركات السيارات بقطر 1 بوصة وبتركيب 2.3 % كربون 2 % سليكون، 0.7 % منجنيز، 1 % نيكل ،1% موليبدنيوم وله صلادة تقارب (BHN 300).

ويمكن الحصول على مارتينسيت حديد الزهر عند تسخين الأستينيت وغمسه أو سقايته في الزيت. فعمود الكامات المتكون من 2.3 % كربون ، 0.7 % منجنيز، 2 % سليكون، 1 % نيكل ، 1% كروم ، 4.0 % موليبدنيوم، يمكن تقسيته للحصول على صلادة عالية تقارب (BHN 550).

وهناك العديد من العناصر التي تضاف إلى الزهر الرمادي بنسب متفاوتة للحصول على خصائص معينة، فمثلا إضافة 20 % نيكل و 2 % كروم يحسن كثيراً من مقاومة الزهر للتآكل بحيث تستعمل هذه السبيكة في صناعة المضخات.

ج - حديد الزهر المطيل (Ductile cast iron):

يدل إسم هذا الزهر على وجود مطيلية، بالإضافة إلى أنه يتصف بمقاومة شد عالية قد تصل إلى (800 MP) مع سهولة في التشغيل على الالات ومقاومة جيدة للاحتكاك وسيولة مناسبة عند السباكة، ويتم الحصول على هذه المزايا بالتحكم في مكونات السبيكة، وذلك بأن لا تتجاوز كمية السليكون 2.5 % ولا تقل كمية المنجنيز

عن 0.4 %، وهذا يعمل على تلافي تكوين كميات كبيرة من الكربيدات، كما يتم التحكم في نسبة الماغنيسيوم عند تركيز منخفض وكذلك الكبريت والفسفور (وهما من العناصر المحفزة لتكوين الجرافيت).

وتتكون البنية المجهرية للزهر المطيل من كرات من الجرافيت في وسط من البرليت كما بالشكل(6-1) وهذا يتشابه مع التكوير في الصلب عالي الكربون، ويمكن معالجة الزهر المطيل كالصلب الكربوني المحتوي على 0.8 % كربون.

د- حديد المطاوع (Malleable iron):

يعتبر حديد المطاوع معدن مطيل جداً وذو صلابة وصلادة منخفضة، وهذا يحد كثيراً من إستخدامه في الهياكل المعدنية، وينتج حديد المطاوع من معالجة حديد الزهر الأبيض عند درجات الحرارة العالية، ويعتمد على كمية الكربون في طور الحديد، وتتم عملية المعالجة على مرحلتين وهما كما يأتي :

ا- تسخين حديد الزهر إلى درجة حرارة 925 درجة مئوية لفترة طويلة من 3 إلى 20 ساعة لتكوير الكربون:

$$\mathbf{Fe_3C + \gamma \longrightarrow \gamma + C\ (graphite)}$$

ب - إتباع إحدى الطرق الآتية حسب كمية الكربون في حديد الزهر الأبيض.

1- حديد المطاوع المنخفض الكربون (فيريت):

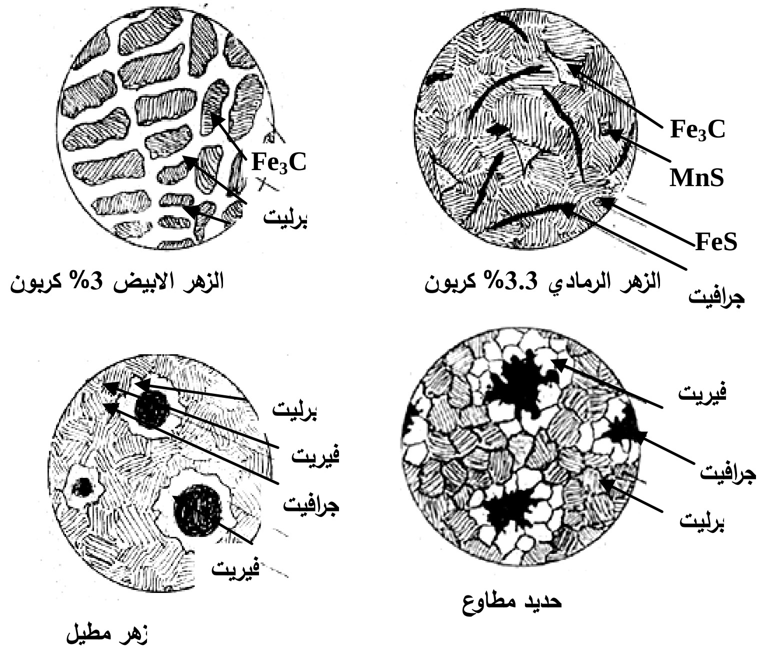
تبريد الزهر من 954 إلى 760 درجة مئوية، وبعد ذلك تبريد ببطء إلى 649 ثم تبريده في الهواء الجوي إلى درجة الحرارة العادية.

2- حديد المطاوع بيرليت (Pearlite):

يتم الحصول على حديد المطاوع من نوع البيرليت من تبريد الزهر في الهواء الجوي تم تحسين خواصه بالتطبيع. والشكل (6-1) يوضح التركيب المجهري لحديد المطاوع.

3 - حديد المطاوع مرتينسيت:

يمكن الحصول على حديد المطاوع من نوع المارتينسيت من غمس الزهر الساخن في الزيت لتكوين المارتينسيت، يتلو ذلك التطبيع للتخلص من الإجهادات الداخلية.



شكل (6-1) التركيب المجهري لحديد الزهر الأبيض والرمادي والمطيل وكذلك الحديد المطاوع.

6 .1. 2 الصلب الكربوني والصلب السبائكي:

تحتوي معظم أنواع الصلب الكربوني على نسبة كربون أقل من 2 % كما تضاف كميات قليلة من السيلكون بما يقارب 0.3 % وكميات متباينة من المنجنيز التي تكون في مدى من 0.2 % إلى 0.95 % منجنيز، وذلك للتخلص من الأكسجين والكبريت اللذان يؤثران كثيراً في الخواص الميكانيكية للصلب ويسببان تأكسده. كما تضاف كميات من عناصر أخرى مثل الكروم والنيكل والموليبدنيوم للحصول على خواص مطلوبة مثل تحسين مقاومة الشد أو التأكسد أو مقاومة الحرارة العالية.

وتضاف هذه العناصر بنسب لا تتجاوز 5 % للحصول على الصلب الكربوني منخفض السبائك (low alloy steel) في حين أن إضافة كميات كبيرة من العناصر السابقة إلى الصلب الكربوني ينتج سبائك أخرى لها مسمياتها مثل الصلب المقاوم للصداء أو صلب السرعات العالية أو صلب العدد أو غيرها من السبائك.

6. 2.1 .1 تصنيف الصلب الكربوني والسبائكي:

هناك العديد من الطرق التي يتم بها تصنيف الصلب الكربوني، فأقدمها وأكثرها شيوعا تلك التي تعتمد على كمية الكربون المتوفرة في السبيكة، وبذلك يمكن تصنيف الصلب الكربوني إلى ثلاثة مجموعات رئيسية وهي:

1 . الصلب منخفض الكربون ويوجد به أقل من 0.25 % كربون.

2 . الصلب متوسط الكربون ويوجد به من 0.25 إلى 0.55 % كربون.

3 . الصلب عالي الكربون ويوجد به أكثر من 0.55 % كربون .

والطريقة الأخرى للتصنيف والأكثر دقة، هي التي وضعها المعهد الأمريكي للصلب والحديد، ويتلخص مضمونها في تحديد أربعة أو خمسة أعداد لكل سبيكة،

وبهذا يمكن تقسيم الصلب الكربوني والسبائكي إلى سلاسل تشترك سبائكها في بعض المكونات والخواص، وتدل أرقام التصنيف على ما يأتي:

العدد الأول من اليسار: يوضح نوع الصلب من حيث العناصر الأكثر تواجداً في السبيكة، فمثلا رقم 1 للصلب الكربوني ،2 لصلب النيكل ، 3 لصلب النيكل والكروم وهكذا .

العدد الثاني: في السبيكة البسيطة التركيب، يوضح نسبة العنصر الأكثر في السبيكة، أما السبائك المعقدة فلا ينطبق عليها نسب العناصر.

العدد الثالث والرابع أو الثالث والرابع والخامس مقسوما على المئة: يبين متوسط كمية الكربون بالسبيكة.

مثال: السبيكة 2520

تعني (من اليسار) 2 : صلب النيكل، 5: 5% نيكل، 20: 2 .0 % كربون. أي أن هذه السبيكة عبارة عن صلب النيكل يوجد بها 5% نيكل و 2 .0 % كربون.

ولقد تم ترتيب الصلب الكربوني والصلب السبائكي في سلاسل من الألف إلى تسعة الآف يدخل في تركيبها العديد من العناصر ولها خواص ميكانيكية متباينة. ومن أهم هذه السبائك ما يأتي:

سلسلة الألف (1xxx)

تتكون هذه المجموعة من الصلب منخفض الكربون أو منخفض السبائك وتحتوي علي كربون بنسبة أقل من 0.25 % مما يجعلها تحتوي أساسا على طور الفيريت، ولذا لا تستجيب للتقسية إلا في حدود ضيقة، ولها قوة شد ضعيفة.

أما السبائك المتوسطة الكربون والتي قد تحتوي على 0.9 % كربون، فإنها تحتوي علي طور البيرليت ويمكن معالجتها حرارياً، كما أنها لها قوة وصلابة أكبر من

سابقتها. وكما ذكرنا سابقاً، يحتوي الصلب الكربوني على كميات من المنجنيز وشوائب ضئيلة من الكبريت والفوسفور والسليكون.

سلسلة الالفين (2×××) صلب النيكل :

تحتوي هذه السلسلة على الحديد والكربون بالإضافة إلى النيكل، وحيث أن النيكل يذوب لانهائيا في الأستينيت كما يذوب في الفيريت، فإنه يزيد كثيراً من قوة شد المعدن والصلابه وكذلك مقاومة الكلال والتآكل، ومن السبائك المشهورة في هذه المجموعة، تلك التي تحتوي على النيكل بنسبة 5%، وتستعمل هذه السبيكة لصناعة التروس وعمود الكامات وعمود المرفق للحافلات والشاحنات.

سلسلة الأربعة ألاف (4×××) صلب الموليبدنيوم :

يمتاز هذا الصلب بإحتوائه على المعادن الثقيلة المقاومة للاحتكاك والتأكسد عند درجات الحرارة العالية، وعلى رأسها الموليبدنيوم والكروم والنيكل، وهذه جميعها لها القدرة على تكوين كربيدات مقاومة للحرارة.

ويعتبر الموليبدنيوم معدن باهض الثمن له ذوبانية محدودة في الفيريت والأستينيت ولذا يضاف بكميات قليلة. ومن سبائك الموليبدنيوم عالية الكربون المجموعة 41×× التي تحتوي على (0.5 كروم أو 0.8 أو 0.95%) وموليبدنيوم بنسبة (0.12 أو 0.2 أو 0.3 %) ويوجد في معظمها كميات كبيرة من الكربون (0.18 إلى 0.56) وتستعمل هذه المجموعة لصناعة خزنات الغاز وأجزاء هياكل الطائرات. ومن السبائك المقاومة للإحتكاك المجموعتان (46xx، 48xx) ولهما تركيب كيميائي كما يأتي :

46xx Ni 0.85 or 1.83 %, Mo 0.2 or 0.25 %
48xx Ni 3.5 %, Cr 0.45 , Mo 0.2 or 0.25 %

وتمتاز هذه المجموعات بقوة شد كبيرة مع مطيلية جيدة ومقاومة إحتكاك عالية وتستعمل في صناعة التروس ومسامير السلاسل ومحاور نقل الحركة (shafts) وكراسي التحميل (Bearing) وغيرها من الأجزاء المقاومة للإحتكاك.

وأخيرا المجموعتان (47xx،43xx) ، وهما من السبائك القوية مثل السبيكة 4340 التي تحتوي على 0.4 % كربون.

43xx   Ni 1.83 , Cr 0.5 or 0.8 , Mo 0.25 %
47xx Ni 1.05 , Cr 0.45 ,   Mo 0.2 or 0.35%

وتستعمل سبائك هذه المجموعة في صناعة دعائم هياكل الطائرات.

سلسلة الخمسة آلاف (×××5) صلب الكروم :

تحتوي سلسلة الخمسة ألآف على صلب مضاف إليه كميات من الكروم، تتباين في تركيزه مابين 0.4 % في حالة (50xx) و1.45% في حالة (52xx) وقد تزيد عن ذلك إلى 5 % في بعض الحالات.

يعتبر الكروم أقل تكلفة من النيكل وأكثر تحملا للعوامل الجوية، وعند تفاعله مع الكربون يكون كربيدات على شكل كربيدات الكروم أو الكروم والحديد (Cr_7C_3 , Cr_4C , $(FeCr)_7C$) وهذه المركبات لها صلادة كبيرة ومقاومة إحتكاك عالية. كما يذوب الكروم بنسبة 13% في الأستينيت وكمية غير محدودة في الفيريت، ويعتمد تأثير الكروم على سبائك الصلب على نسبة تواجده في السبيكة وذلك كما يأتي:

1. كروم أقل من 5 % : يزيد من قوة الشد والصلابة مع زيادة طفيفة في مقاومة التآكل. كما أن إضافة الكروم بنسبة 2 . 4 % يعمل علي تحسين الخواص المغناطيسية .

2. كروم أكثر من 5 % : يقاوم درجات الحرارة العالية والاحتكاك ومقاومة التآكل بالإضافة إلى تحسين الصلابة . ويلاحظ أنه هناك إحتياج إلى كميات كبيرة من الكروم تزيد عن 13 % للحصول على هذه النتائج كما في الصلب المقاوم للصداء.

سلسلة ستة ألآف (6xxx) صلب الفاناديوم:

يعتبر الفاناديوم الأكثر كلفة من أي عنصر مضاف آخر إلى الصلب الكربون، ويمتاز هذا الصلب بخواص ميكانيكية جيدة مثل الصلادة العالية مما تجعله مقاوماً جيدا للإحتكاك. ومن أهم سبائكه سلسلة (61xx) التي تحتوي على الفاناديوم بنسبة 0.6 إلى 0.95 % والكروم بنسبة 0.13 إلى 0.15 %

3 .1.6 صلب العدد (Tool Steel):

من الناحية النظرية، أن أي صلب يصنع منه العدد، يسمى صلب العدد، ولكن عمليا هناك عدد من السبائك الخاصة التي يصنع منها أدوات القطع والتجليخ والتشكيل، وهي التي تسمى بصلب العدد.

وينقسم صلب العدد من ناحية التركيب إلى مجموعتين رئيسيتين؛ الأولى تتكون من صلب عالي الكربون، ويعتبر أقل تكلفة من الأنواع الأخرى إلا أنه يعاني من تدني الكفاءة عند التشغيل وذلك بسبب خروج الكربون من المعدن عند إرتفاع درجة حرارته بفعل الإحتكاك عند القطع أو التجليخ، والذي يؤدي إلى فقد الصلابة والصلادة، ولذا فإن أدوات الثقب وسكاكين القطع المصنعة من الصلب الكربوني لا تدوم طويلاً.

أما النوع الثاني من صلب العدد فهو صلب السرعات العالية، ويحتوي هذا الصلب على كميات كبيرة من المعادن الثقيلة مثل الفاناديوم والكروم والكوبلت

والتنجستون، والتي قد تتجاوز 25 % من وزن السبيكة، وهذه العناصر تعمل على تكوين كربيدلت عالية الصلادة ولها ثبات ومقاومة جيدة للإحتكاك عند درجات الحرارة العالية، وذلك أن أكاسيد وكربيدات هذه المعادن غير موصل للحرارة ودرجة إنصهارها كبيراً جداً مقارنة بكربيد الحديد في حالة الصلب عالي الكربون.

ويصنف صلب العدد حسب المكونات وعملية التبريد المقامة عليه عند التصنيع وكذلك الغرض من الإستعمال، وتستخدم عدة حروف وأرقام للدلالة على نوع صلب العدد وهي كما يأتي:

المجموعة	**نوع المعالجة**
W	صلب كربوني مقاوم للحرارة " مقاوم للصدمات الحرارية".
S	يمكن تشكيله على البارد.
O	يحتوي على 1 % كربون ويمكن تقسيته بالتبريد في الزيت.
A	يحتوي على 1 إلى 2% كربون مع 5 % كروم ويمكن تقسيته بالتبريد في الهواء الجوي.
D	صلب عالي الكربون به كروم تم تشكيله على الساخن.
H	صلب منخفض الكربون يحتوي على أي من المعادن الثقيلة.
T	أقلام التجليخ ؛ 1% كربون 12-18% تنجستون و 4 % كروم.
P	صلب منخفض الكربون يصنع منه قوالب الصلب.

صلب للأغراض خاصة:

L	صلب منخفض السبائك.
F	يوجد بالصلب كربون وتنجستون.

فمثلا الصلب W1 الذي لا يوجد به عناصر أخرى غير الكربون ويمكن تقسيته بالماء، و O1 يمكن سقايته بالزيت للحصول على عدد صلبة وصلدة . و H تستعمل لقوالب التشكيل على الساخن لأنها منخفضة الكربون (عالي الكربون قد يصاب بالتشققات عند التعرض للصدمات الساخنة) وأخيراً T1 يستعمل لصناعة عدد قطع سريعة (High speed steel) ويحتوى على تنجستون وكروم أو كوبلت أو فاناديوم. ورغم إرتفاع أسعار أذوات القطع المصنعة من صلب السرعات العالية إلا أنها تسترد قيمتها مع الزمن وتشتغل بكفاءة عالية.

4.1.6 الصلب المقاوم للصدأ:

يستعمل الصلب المقاوم للصدأ لغرضين أساسيين وهما مقاومة التآكل وتحمل درجات الحرارة العالية، ويستعمل نظام 3 أرقام لتصنيف هذه المجموعة من الصلب، بحيث يدل الرقم الأول على العنصر أو العناصر الأساسية في السبيكة، ولا يوجد للرقمين الأخيرين معنى معين.

سلسلة المئتين 2XX :

تحتوي سلسلة المئتين على الكروم والمنجنيز مع القليل من النيكل، وتوجد على شكل طور الأستينيت وهي غير قابلة للمغنطة. ويدخل المنجنيز في هذه السلسلة بديلا عن النيكل للحصول على طور الأستينيت عند درجة الحرارة العادية، وبذلك يمكن الحصول على سبائك أقل تكلفة من التي تحتوي على النيكل.

سلسلة ثلاثمئة 3XX :

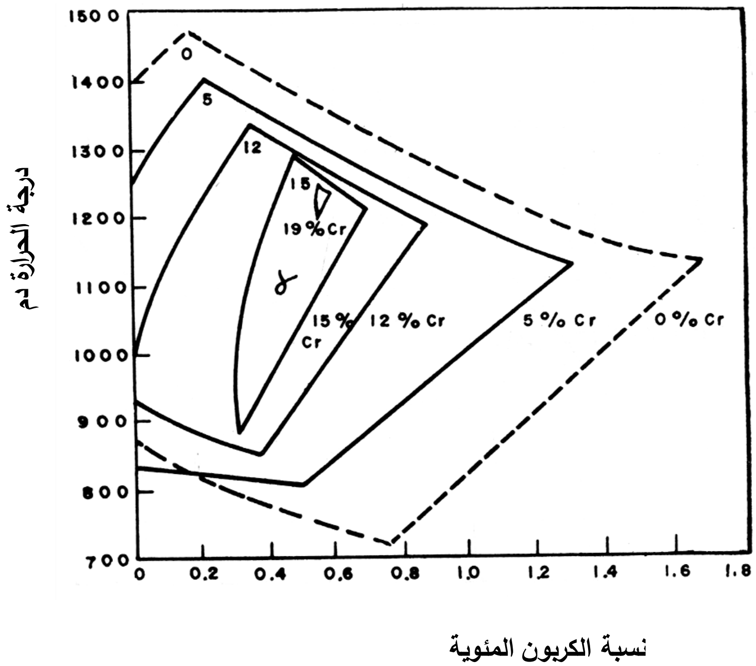
تعتبر سلسلة الثلاثمئة من السلاسل الأكثر أهمية في الصناعة، وتحتوي على الكروم والنيكل بالإضافة إلى الحديد والكربون، وتتكون من طور الأستينيت غير قابل للتقسية بالمعالجة الحرارية، وغير قابل للممغنطة، وهذه السبائك شديدة الصلابة والصلادة، وذات قوة شد عالية مع مقاومة جيدة للتآكل والإحتكاك.

سلسلة أربعمائة 4XX :

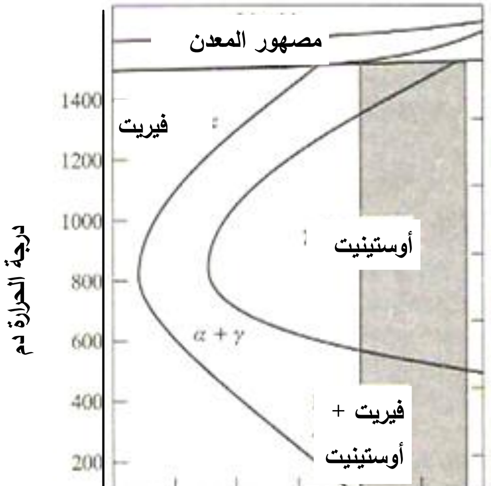
تتكون هذه السلسلة من سبائك تحتوي على الكروم والحديد بالإضافة إلى كميات متباينة من الكربون وجميعها قابل للمغنطة، وتندرج تحت مجموعتي الفيريت غير قابلة للتقسية بالمعالجة الحرارية، والمارتينسيت الشديد الصلادة والقابل للمعالجة الحرارية.

والجدير بالذكر أن جميع أنواع سبائك الحديد المقاوم للصدأ تحتوي على عنصر الكروم بكميات تتجاوز 13% ، وذلك أن هذا العنصر يعمل على تكوين أكسيد الكروم مع أكسيد الحديد (Cr_2O_3 & Fe_2O_3) من نوع الغشاء السالب (Passive film) على سطح المعدن ليحمي السبيكة من التآكل.

ويلاحظ كذلك أن وجود الكروم مع الحديد والكربون يزيد من درجة الحرارة الحرجة من 723 إلى 900 درجة مئوية في حالة 18 % كروم، وهذا يساعد على تحمل السبيكة لدرجات الحرارة العالية، ويقلل من مساحة الأستينيت كما هو موضح بالشكل(6 -2). في حين أن النيكل يعمل على تكبير مساحة الأستينيت حتى يكون الأستينيت متوفر في درجات الحرارة العادية عندما يكون النيكل بنسبة أعلى من 8 % في السبيكة وقد يصل إلى 24 % بالوزن.



شكل (6 -2) تأثير الكروم على مساحة طور الأستينيت.



شكل(6 -3) العلاقة بين نسبة النيكل ودرجة الحرارة للصلب المحتوي على 18% كروم.

أطوار الصلب المقاوم للصدأ:

تتدرج سلاسل الصلب المقاوم للصداء في ثلاثة مجموعات رئيسية وهي؛ صلب المارتينست وصلب الفيريت وصلب الأستينيت، ولكل من هذه الأطوار خواصه الفيزيائية والكيميائية وإستخداماته الصناعية:

المجموعة الأولى : صلب المارتينسيت (Martensitic Stainless Steel):

يتركب صلب المارتنسيت من حديد يوجد به 11.5 إلى 18 % كروم وكمية من الكربون تتراوح ما بين 0.15 إلى 1.2 %، وهذه الكمية الكبيرة من الكربون تساعد على زيادة مساحة الأستينيت عند التسخين كما بالشكل (2.6)، الأمر الذي يمكن به الحصول على كمية مناسبة من المارتنسيت عند التبريد السريع للاستينيت. ويظهر صلب المارتنسيت تركيباً داخلياً تحت المجهر، مكوناً من كربيدات الحديد والكروم في وسط من المارتينسيت، وهذه السبائك قابلة للتقسية عن طريق المعالجة الحرارية، وتتصف بالصلادة العالية والخواص المغنطيسية الجيدة، إلا أن مقاومتها للتآكل ضعيفة مقارنة بأنواع الصلب المقاوم للصدأ الأخرى.

والجدول(1.6) يوضح التركيب الكيميائي للمجموعات الرئيسية للصلب المقاوم للصدأ. فمثلا يستعمل صلب المارتينسيت من نوع 410 الذي يحتوي على 12 % كروم و 416 المشابه له في صناعة ريشات التربينات والنوع 440A المضاف إليه معدن الموليبدنيوم لصناعة الصمامات وكرات كراسي التحميل كما يستعمل الصلب 420 لصناعة أدوات الجراحة . وعند إضافة 2 % نيكل و 6-18 % كروم وبوجود كمية قليلة من كربون نتحصل على السبيكة 431 ذات الصلابة والصلادة العالية، وتستعمل هذه السبيكة في صناعة القلووذات والمضخات وتجهيزات الطائرات.

المجموعة الثانية : صلب الفيريت (Ferritic Stainless Steel):

تحتوي هذه المجموعة على حديد يوجد به 12 إلى 30 % كروم، ويتكون من طور واحد هو الفيريت ذو البلورة المكعبة الوسطية، ولذا لا يمكن تقسيته بالمعالجة الحرارية، ويمكن تقسيته بالتشغيل على البارد (Cold work)، ولصلب الفيريت مقاومة للصدأ أفضل من صلب المارتنسيت ويعتبر أسهل في التشغيل على الالات، ويمتاز صلب الفيريت كذلك بخواصه المغناطيسية الجيدة.

ويستعمل صلب الفيريت كثيراً في عمليات التشكيل على البارد أو الساخن لصناعة الخزانات والأنابيب ومن هذه السبيكتان 446 و 442 اللتان لهما مقاومة جيدة للحرارة نتيجة لوجود كمية عالية من الكروم وتستعملان في صناعة الأفران وغرف الإحتراق، وكذلك السبيكة 430 التي تستخدم للاغرض العامة عند درجة الحرارة العادية.مثل تجهيزات المطابخ والخزانات بالمصانع وغيرها.

المجموعة الثالثة : صلب الأستينيت (Austenitic Stainless Steel):

يتكون صلب الأستينيت بالضرورة من حديد يوجد به 16 إلي 28 % كروم و 7 إلى 22 % نيكل، وهذه المجموعة تسمى كذلك لأنها تتواجد على شكل طور الأستينيت (بلورات مكعبة سطحية) عند درجة الحرارة العادية، ويرجع الفضل في ذلك إلى وجود النيكل أو المنجنيز بكمية مناسبة لتكوين الأستينيت، ويظهر تحت المجهر على شكل حبيبات ذات زوايا مع توائم متوازية كما بالشكل (6 -3).

والجدير بالذكر أنه لا يمكن تقسية سبائك الأستينيت بالمعالجة الحرارية، وذلك بسبب عدم وجود تغير في البنية الداخلية للسبيكة عند التسخين أو التبريد، وتتم التقسية غالبا بالتشغيل على البارد. وتتسم هذه المجموعة بمقاومة جيدة للتآكل أي أنها

لها مقاومة أكبر من المجموعتين السابقتين، كما يبدي صلب الأستينيت صلابة وصلادة عالية ومقاومة جيدة للتأكسد عند درجات الحرارة المرتفعة.

إن سبائك الأستينيت تعتبر من أكبر وأهم مجموعات الصلب المقاوم للصدأ، وتتكون من سلسلتين هما سلسلة المئتين 2XX وتحتوي على الحديد والكروم والمنجنيز والثلاثمئة وتحتوي على الحديد والكروم والنيكل وهذه المجموعة الأخيرة صلدة وقاسية جداً ويصعب تشغيلها على الالات ولها خاصية مقاومة الحرارة العالية مع مقاومة جيدة للتآكل.

ومن السبائك المشهورة في هذه المجموعة، السبيكة 304 التي يصنع منها العديد من الهياكل المعدنية مثل الأنابيب والخزانات للعديد من الصناعات الغذائية والدوائية والبتروكيميائية، وكذلك السبيكة 316 وهي عبارة عن السبيكة 304 مضاف إليها عنصر الموليبدنيوم، وتمتاز هذه السبيكة بمقاومة جيدة للتآكل في مياه البحر والمياه المالحة الأخرى. ويمكن تحسين التشغيل على الالات وتقليل الصلادة باضافة عناصر أخرى مثل السيلينيوم أو الكبريت كما هو في السبيكة **303 Se** والجدول(1- 6) يبين التركيب الكيميائي لبعض سبائك صلب الاستتينيت .

ومن العيوب التي تواجه هذه المجموعة عند اللحام هو ترسب الكربيدات بين حبيبات الأستينيت (grain boundaries) مع وجود نقص شديد في كمية الكروم بها مما يجعلها معرضة للتآكل بالإجهاد، أي يحدث لها تشققات بين الحبيبات. ويتم معالجة ذلك بتخفيض نسبة الكربون بهذه السبائك من 0.06 إلى 0.03 % وهذا يحد من تكوين الكربيدات في المنطقة المحيطة باللحام كما في السبيكة 304l أو بإضافة عناصر مثبتة مثل التيتانيوم في السبيكة 321 أو النايوبيوم في السبيكة 347 .

شكل (6 -3) التركيب المجهري للسبيكة 304 من الصلب المقاوم للصداء.

جدول(6-1) يوضح الخواص الميكانيكية لبعض سبائك الصلب المقاوم للصداء.

Alloy	Comp (%)	TS (MPa)	YS (MPa)	El (%)	H T
		سبائك صلب الفيريت			
430	17Cr, 0.012 C	517	345	25	Ann.
446	25Cr, 0. 20 C	552	345	20	Ann.
		سبائك صلب المارتينسيت			
410	12.5 Cr, 0.15 C	517	276	30	Ann.
440A	17Cr, 0.70 C	724/1828	414/1690	20/5	Ann/Q&T
440C	17 Cr, 1.1 C	759/1966	276/1897	13/2	Ann/Q&T
		سبائك صلب الأستينيت			
301	17 Cr,7 Ni	759	276	60	Ann.
304	19 Cr, 10 Ni	580	290	55	Ann.
304L	19 Cr, 10 Ni, 0.03 C	559	269	55	Ann.
321	18Cr, 10Ni, Ti	621	241	45	Ann.
347	18Cr,10Ni, Nb	655	276	45	Ann.

El%: elongation in 2inch %, HT: Heat treatment, Ann. Annealed, Q&T: quenched and tempered.

2.6 السبائك غير الحديدية:

1.2.6 سبائك الالومنيوم:

يعتبر الألومنيوم وسبائكه من أكثر المعادن إستعمالاً بعد الصلب، حيث يمتاز الألومنيوم بكثافته المنخفضة التي تبلغ 2.74 جرام/سم3 وقوة الشد الجيدة، بحيث يمكن القول أن سبائك الالومنيوم لها أكبر قوة شد بالنسبة إلى الوزن مقارنه بأي معدن آخر، كما أن الألومنيوم تترتب ذراته على شكل مكعبات سطحية، مما يجعله مطيل (Ductile) وسهل التشكيل والتشغيل على الالات، وبذلك يمكن إجمال خواص الالومنيوم فيما يأتي:

1. للالومنيوم كثافة تعادل ثلث كثافة الحديد.
2. معظم سبائك الألومنيوم سهلة التشكيل والتشغيل على الآلات.
3. لسبائك الالومنيوم نسبة عالية لقوة الشد إلى الكثافة.
4. للألومنيوم غشاء سالب مقاوم للظروف الجوية.
5. يمكن تكسية أو طلاء سبائك اللألومنيوم للحصول على أسطح عالية الجودة من ناحية الشكل أو من ناحية مقاومة التآكل.
6. يمتاز الالومنيوم بتوصيلية عالية للحرارة والكهرباء.
7. يمكن صقل الالومنيوم للحصول على أسطح لامعة أو عاكسة للأشعة.
8. الألومنيوم معدن غير قابل للمغنطة وليس له تأثير بيولوجي سام.

1.1.2.6 تأثير العناصر المضافة على خواص سبائك الالومنيوم:

يمتاز الألومنيوم بذوبانية عالية للعديد من العناصر المضافة إلى مصهوره، إلا أن الذوبانية تقل كثيراً في الوسط الصلب كما هو مبين في الجدول (6–2).

إن المركبات التي تتكون عند إضافة كميات قريبة من نسبة الذوبان يكون مردودها جيداً على الخواص الميكانيكية للسبيكة، في حين أن الكميات الكبيرة من العناصر المضافة تعمل على تكوين أطوار كثيرة من ضمنها طور المعدن المضاف وهذا يؤدي إلى زيادة صلادة السبيكة مع نقص في الصلابة ومقاومة الشد. وعلى وجه العموم فإن مجموع العناصر المضافة قلما تتجاوز نسبة 14% من وزن سبيكة الالومنيوم.

جدول (2.6) ذوبانية بعض المعادن في سبائك الالومنيوم.

العناصر	الذوبانية { % بالوزن}	
المضافة	**في درجة الحرارة العادية**	**عند درجة حرارة التصلب**
Mg	0.02	5.65 % at 548 ^{o}C
Mn	2.5	14.9 % at 450 ^{o}C
Si	0.3	1.8 % at 659 ^{o}C
Zn	0.1	1.65 % at 577 ^{o}C
Cu	2	82 % at 716 ^{o}C

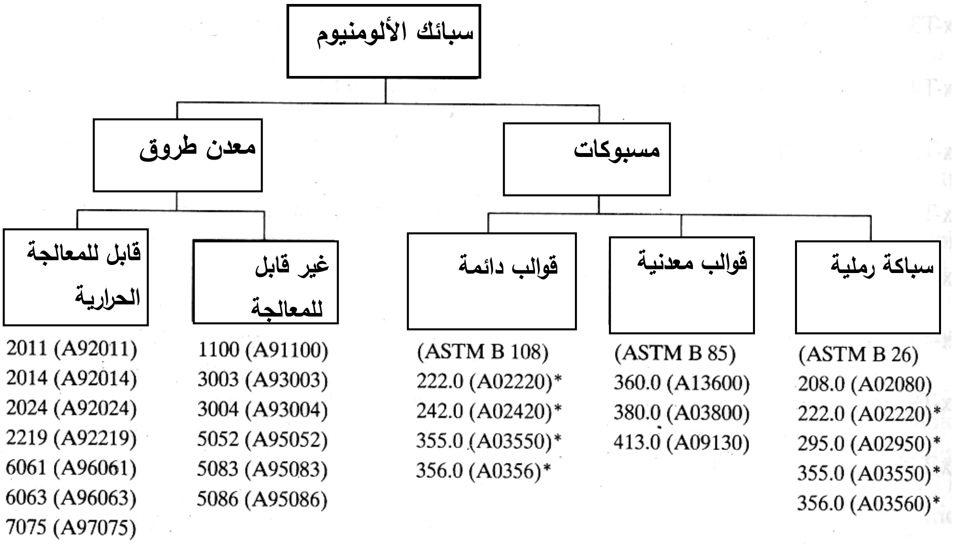
ومن ناحية أخرى فإن كل عنصر من العناصر المضافة يختص بتأثير معين على خواص السبيكة التي يكون جزاً منها أي أن هذه العناصر قد تم إضافتها للحصول على خواص ميكانيكية أو فيزيائية مرغوبة والجدول (6–3) يوضح تأثير مختلف العناصر على خواص سبائك الألومنيوم.

جدول (3.6) تأثير إضافة بعض العناصر على سبائك الالومنيوم.

العنصر	التأثير
Fe	يوجد كشوائب بنسبة ضئيلة، يزيد من قوة الشد ويقلل من التشققات الساخنة عند السباكة.
Mn	يزيد من السيولة ويقلل من الانكماش عند السباكة ويزيد من المطيلية والصلابة للسبيكة.
Si	يزيد من السيولة ويقلل من التشققات الساخنة عند السباكة مع زيادة الصلادة ومقاومة التآكل
Cu	بنسبة تقل عن12% يزيد من قوة الشد ومقاومة الحرارة ويحسن التشغيل علي الالات.
Mg	يزيد من قوة الشد والصلابة عند تركيز يقل عن 6%، وبعدها تكون السبيكة صعبة السباكة.
Zn	يزيد من قوة الشد والصلابة بنسبة من 3-6% ويسبب تشقق الانكماش عند تركيز10%.
Cr	يضاف بنسبة تقارب 0.35% لتكوين حبيبات صغيرة، ويزيد التوصيلية في بعض السبائك.
Ti	يوجد طبيعيا في خامات الالومنيوم وقد يضاف بنسب قليلة لتكوين حبيبات صغيرة.
Pb-Bi	يضاف لتسهيل التشغيل على الالات.

2.1.2.6 تصنيف سبائك الالومنيوم:

يوجد هناك عدة تصنيفات لسبائك الالومنيوم منها تلك التي تعتمد على طريقة التصنيع مثل الالومنيوم الطروق الذي يمكن معالجته حرارياً أو الذي لا يستجيب للمعالجة أو المصنع بالسباكة وهذا بدوره يقسم إلى أنواع مثل السباكة الرملية أو بالقوالب الدائمة أو بالضغط، والشكل (6-4) يبين هذه التفريعات مع توضيح أهم السبائك لكل مجموعة حسب المواصفة الأمريكية لاختبار المواد (ASTM) والذي تبنته من جمعية الالومنيوم.



شكل (4-6) تقسيم سبائك الالومنيوم حسب طريقة التصنيع.

ولقد وضعت جمعية الالومنيوم سنة 1954 نظاما من أربعة أرقام لتصنيف سبائك الالومنيوم والذي يعتمد على العناصر المضافة وطريقة المعالجة الحرارية، وهذا النظام يستعمل على نطاق واسع، ويتركز ترقيم السبائك على وجود أربعة أرقام للمعدن الطروق (Wrought Aluminum) وثلاثة أرقام مع كسر عشري للمسبوكات.

ا. الألومنيوم الطروق (Wrought Aluminum):

ينقسم الألومنيوم الطروق وهو المعدن الذي يمكن تشكيله بالدرفلة والسحب والضغط أو الطرق إلى ثمانية سلاسل في كل منها العديد من السبائك التي تتشابه في العناصر المضافة وتختلف في نسبها، وتتشابه سبائك المجموعة الواحدة كذلك في خواصها الميكانيكية وطريقة المعالجة الحرارية ومقاومتها للتآكل. والقائمة الآتية تبين سلاسل أرقام الومنيوم الطروق مع توضيح لأهم العناصر المضافة إلى كل منها:

العناصر الأساسية المضافة	المجموعة
AL 99%	1XXX
Cu	2XXX
Mn	3XXX
Si	4XXX
Mg	5XXX
Mg and Si	6XXX
Zn	7XXX
Other elemements	8XXX

سلسلة الألف 1XXX

تحتوي سلسلة الألف على سبائك من معدن الالومنيوم ذو نقاوة عالية أي ما يساوي 99 % أو أكثر، مع إضافات ضئيلة، ويستعمل هذا المعدن في عدة مجالات مختلفة مثل الأواني المنزلية، والأسقف المعلقة للمباني، والمبادلات الحرارية، والموصلات الكهربية وغيرها من الأغراض التي تحتاج إلى قوة شد متوسطة ومقاومة كبيرة للتآكل، أو توصيلية عالية للحرارة والكهرباء.

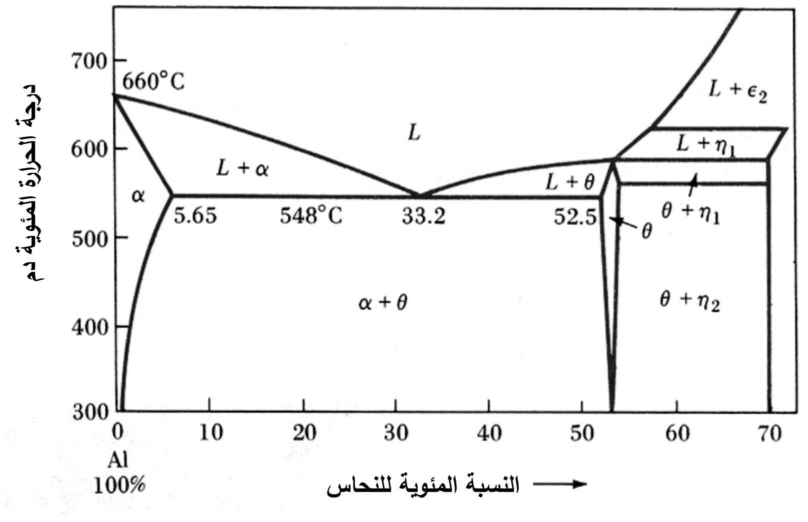
سلسلة ألفان 2XXX

تمتاز هذه السلسلة بقوة شد كبيرة، نتيجة لإضافة 4-6 % نحاس مع عناصر أخرى مثل الماغنيسيوم والمنجنيز. وهذه السبائك يتم تقسيتها بالتعتيق الصناعي وكذلك التشغيل على البارد.

ويتكون نتيجة المعالجة الحرارية مركبات الألومنيوم والنحاس ($CuAl_2$) أو مركبات الألومنيوم والنحاس والماغنيسيوم (Al_2CuMg) وهذه المركبات تترسب على حواف الحبيبات (Grain boundary) وتساعد على زيادة صلادة وصلابة هذه السبائك، والشكل(6-5) يبين مخطط إتزان الالومنيوم والنحاس. إلا أن ما يؤاخذ على

هذه المركبات أنها تمثل منطقة مهبطية مما يعجل من تآكلها بعدة طرق منها التآكل بالاجهاد التصدعي (SCC) والتقشر (Exfoliation).

ومن السبائك المستعملة كثيراً السبيكة 2014 ،2017 ، 2024. فسبيكة ديورالومين 2017 تحتوي على 4 % نحاس وتستعمل في صناعة مسامير البرشمة لهياكل الطائرات، والسبيكة 2024 تحتوي على نحاس ومنجنيز ويتم تقسيتها بالتعتيق الصناعي، وتستعمل لصناعة هياكل الشاحنات وتجهيزات الطائرات، والسبيكة 2021 تستعمل لصناعة هياكل صواريخ الوقود السائل.



الشكل (6-5) مخطط إتزان معدني الالومنيوم والنحاس.

سلسلة ثلاثة ألآف 3XXX

تتشابه سلسلة ثلاثة ألآف مع سلسلة الألف مع السلسلة أربعة ألاف في الكثير من الخواص، وتحتوي سبائك هذه المجموعة على معدن المنجنيز بنسبة 1 إلى 2 % بالإضافة إلى كميات قليلة من النحاس تقارب 15. 0 % .

وحيث أن العناصر المضافة قليلة التركيز بالسبيكة، فإن ذلك لن يحدث تغيراً في البنية الداخلية عند التسخين مما يجعلها تحتفظ بطور واحد، ولذا فإن هذه المجموعة كما في السلسلة ألف لا تستجيب للمعالجة الحرارية. ومن السبائك المستعملة كثيراً في هذه السلسلة، السبيكة **3003** التي تمتاز بسهولة تشكيلها على البارد. وتستعمل هذه السبائك في صناعة المبردات والمبادلات الحرارية والخزانات المقاومة للضغط وغيرها.

سلسلة أربعة آلاف 4XXX

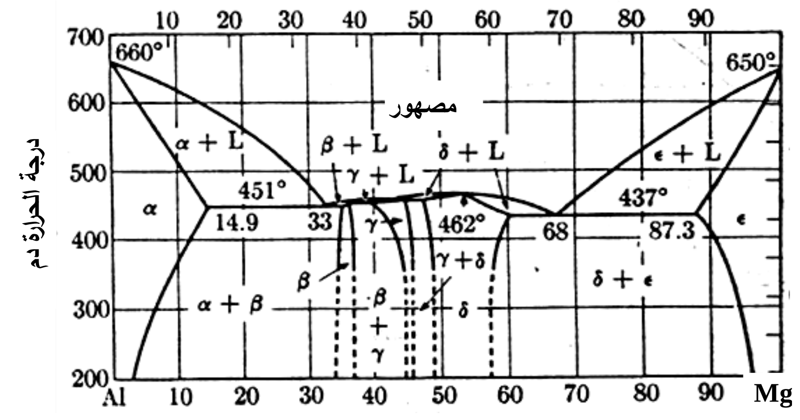
تحتوي سلسلة أربعة آلاف على سبائك ألومنيوم التي يوجد بها كمية كبيرة السليكون، الأمر الذي يجعلها ذات مقاومة عالية الحرارة، بالإضافة إلى مقاومة التآكل، كما يعطي السليكون خاصية السيولة لمصهور السبيكة عند صبها مما يجعلها سهلة السباكة.

وتعتبر السبيكة 4032 من أكثر السبائك إستعمالاً في هذه المجموعة، حيث أنها تحتوي على 12.5 % سليكون ويمكن تشكيلها بسهولة على الساخن، كما أنها تمتاز بانخفاض معامل التمدد الحراري ولذا تستعمل في صناعة كباسات محركات السيارات (Pistons).

سلسلة خمسة آلاف 5XXX

يضاف الماغنيسيوم الخفيف الوزن إلى الألومنيوم في هذه السلسلة ليزيد من قوة الشد، وقد تضاف كميات قليلة من معادن أخرى مثل الكروم أو المنجنيز لتحسين خواص سبائك هذه المجموعة، وتعتمد كمية طور بيتا في السبيكة على كمية الماغنيسيوم كما هو مبين في الشكل**(6-6)** ، ويساعد هذا الطور كثيراً على زيادة صلابة المعدن.

وتجمع هذه السلسلة بين قوة شد جيدة ومقاومة للتآكل ويختلف التركيب من سبيكة إلى أخرى، فمثلا السبيكة (5005) تحتوي على 0.8 % ماغنيسيوم في حين أن السبيكة 5456 تحتوي على 5.25 % مع كمية قليلة من المنجنيز (0.0 – 8 %) والنحاس (0.0 –0.25 %) .



شكل(6-6) مخطط إتزان اللألومنيوم والماغنيسيوم.

وتستعمل سبائك هذه المجموعة في صناعة الصفائح والأنابيب، وأنابيب توزيع الوقود والزيوت للعربات والطائرات مثل السبيكة (5050) التي تحتوي على 0.2 % ماغنيسيوم والسبيكة (5052) التي يوجد بها 2.5 % ماغنيسيوم و0.25 % كروم، حيث تستعمل في صناعة هياكل الحافلات والمقطورات والبواخر، كما أن السبيكة (5083) المحتوية على 4.5 % ماغنيسيوم، تمتاز بقابليتها للحام بصورة جيدة. وتستعمل سبائج هذه المجموعة لصناعة الهياكل المعدنية وخاصة البحرية منها وفي صناعة خزانات الضغط العالي.

سلسلة ستة ألآف 6XXX

تعتمد سبائك هذه المجموعة على وجود عنصري الماغنيسيوم والسليكون بنسبة شبه ثابتة حسب المركب (Mg_2Si) الذي يترسب بين الحبيبات ويزيد من قوة السبيكة، ولذلك يمكن معالجة هذه السبائك حراريا للحصول على مقاومة شد عالية، كما تضاف عناصر أخرى مثل الكروم والنحاس لتحسين خواص هذه السلسلة.

ومن السبائك المهمة في هذه المجموعة السبيكة 6061 التي تستعمل في صناعة دعائم الهياكل المعدنية للعربات والحافلات وهياكل القوارب والبواخر ومبردات السيارات، كما تستعمل السبيكة 6063 في صناعة ألانابيب والاشكال الهندسية الأخرى بطريقة البثق على نطاق واسع.

سلسلة سبعة ألآف 7XXX

تتركب سلسلة السبعة ألاف من 3–5 % Zn ، 1 – 3 % Mg و0–2 % Cu وهي من المجموعات القوية في سلاسل الألومنيوم ، حيت تمتاز بأكبر قوة شد إلى الكثافة مع مقاومة عالية للكلال. ومن المعروف أن المقاطع السميكة لسبائك هذه السلسلة يحتوي على Mg_3AL_2 أو $MgZn_2$ بين حبيبات المعدن (Grain boundary) وهذه المركبات مصعدية في طبيعتها مما يؤدي إلى تعرض هذه المنطقة للتآكل وخاصة التآكل بالإجهاد التصدعي (SCC) عند تعرضها إلى إجهاد كبير في وسط آكل؛ مثل الأوساط التي تحتوي على كميات كبيرة من الكلور أو الهالوجينات الأخرى. ومن السبائك المشهورة في هذه السلسلة ما يأتي.

7075 { 5.5% Zn , 2.5% Mg , 1.5 % Cu +.3 %Cr }

7079 {4.3 % Zn , 3.3 % Mg , 0.6 % Cu }

7178 { 6.8 % Zn , 2.7 % Mg , 2 % Cu}

وتستعمل السبائك السابقة في المجالات التي تحتاج إلى مقاومة شد عالية ومقاومة الكلال مثل هياكل الطائرات (7075) والأجزاء الأخرى من الطائرة.

وإجمالا فإن مفاضلة سبائك الألومنيوم تكون كما يأتي:

1- عندما يكون هناك حاجة إلى قوة شد متوسطة للسبيكة ومقاومة جيدة للتآكل يكون الإختيار بين مجموعة الألف أو الثلاثة آلآف.

2- وفي حالة الإحتياج إلى قوة شد أكبر من المجموعتين السابقتين مع مقاومة متوسطة للتآكل فإن الإختيار يكون من المجموعتين الخمسة أو الستة ألآف.

3- أما في حالة الرغبة في إستعمال سبائك ذات قوة شد كبيرة، ولا ضرر من وجود مقاومة تآكل ضعيفة، فإن المجموعة ألفان والمجموعة سبعة ألآف هما الإختيار الأنسب. وتحتاج هذه المجموعتين السابقتين إلى إستعمال وسائل للحماية من التآكل مثل الطلاء.

ب.مسبوكات الالومنيوم (Cast Aluminum):

مسبوكات أو مصبوبات الألومنيوم هي السبائك التي ثم تصنيعها بالسباكة، وتتصف بأنها صلدة وذات قوة شد ضعيفة، مع درجة إنصهار منخفضة، ولا يمكن درفلتها أو سحبها فهي غير قابلة للسحب أو الطرق.

وتصنف هذه المسبوكات إلى مجموعات لكل منها ثلاثة أرقام مع كسر عشري كما يضاف لها أرقام وحروف لتدل على طريقة المعالجة الحرارية كما في سبائك الالومنيوم الطروق (Wrought Aluminum)، ويدل الرقم الأول من اليسار على العناصر الأساسية المضافة والرقم الثاني والثالث على السبيكة داخل المجموعة والرقم العشري على نوع المنتوج.

والقائمة الآتية تبين أهم السلاسل والعناصر المضافة لكل منها:

العناصر الأساسية المضافة	المجموعة
AL 99.5 %	1XX.X
Cu	2XX.X
Si + Cu or Mg	3XX.X
Si	4XX.X
Mg	5XX.X
لم تستعمل	6XX.X
Zn	7XX.X
Tin	8XX.X
عناصر أخرى	9XX.X

ويلاحظ أن التركيب الكيميائي لمسبوكات الألومنيوم تختلف كثيراً عن سبائك الألومنيوم الطروق، فمثلا يضاف السليكون بنسب من 5 إلى 12 % لزيادة السيولة وزيادة قوة المعدن، كما يضاف الماغنيسيوم بنسب من 0.3 إلى 1 % لزيادة مقاومة الشد عند درجات الحرارة العادية، في حين أن إضافة 1 إلى 4 % نحاس يزيد من مقاومة الشد عند درجات الحرارة العالية نسبيا، هذا كما تضاف معادن أخرى مثل الكروم والخارصين والتيتانيوم لتحسين خواص مسبوكات الالومنيوم.

2.1.2.6 المعالجة الحرارية لسبائك ومسبوكات الألومنيوم:

تتشابه المعالجة الحرارية للألومنيوم الطروق والمسبوكات من حيت عملية تصنيف وترقيم المعالجة الحرارية، وذلك بأن يتبع ترقيم السلسلة حروف وأرقام تدل على عمليات التصنيع أو المعالجة الحرارية المقامة على السبيكة أو المسبوكة، وهذا التصنيف يشمل ما يأتي:

F : السبيكة أو المسبوكة كما هي مصنعة (أي بدون معالجة حرارية).

O : مقام عليها تلدين.

H : تم تشكيلها على البارد بالدرفلة أو الكبس الشد أو غيرها.

T : معالجة حرارية للمحلول الجامد (ويبين الرقم بعده طريقة المعالجة).

ونعني بمعالجة حرارية للمحلول الجامد هو تسخين سبيكة الألومنيوم إلى المنطقة ما قبل الإنصهار {100 دم تقريبا أقل من درجة الإنصهار} لفترة من الزمن تعرف بزمن النقع وذلك لجعل السبيكة متجانسة ثم التبريد في الماء عند درجة الحرارة العادية لتكوين محلول جامد ومشبع، ويعتمد زمن النقع على سمك المعدن.

ولتحسين خواص هذه السبيكة الصلدة، يقام لها تعتيق، وذلك لتكوين محلول ناعم من المواد المترسبة، وهذه المواد تمنع تحرك الانخلاعات (Dislocations) وبذلك تزداد الصلابة وتنخفض الصلادة مع الاحتفاظ بقوة شد عالية.

T2: تلدين للمسبوكات بعد المعالجة الحرارية للمحلول الجامد.

T3 : التقسية بمعالجة حرارية للمحلول الجامد ثم التشغيل على البارد.

T4 : التقسية بمعالجة حرارية للمحلول الجامد وبعد ذلك التعتيق الطبيعي (أي التصليد بمرور الزمن).

T5 : تعتيق صناعي أي التسخين إلى درجة حرارة ما بين 15 –25 % من درجة المعالجة للمحلول الجامد.

T6 : التقسية بمعالجة حرارية للمحلول الجامد ثم التعتيق الصناعي . ويعمل التعتيق على إعادة ترتيب وتنظيم الحبيبات بداخل السبيكة بحيث تزداد مقاومة الشد والصلابة للمعدن.

والجدير بالذكر أن سبائك سلاسل الألف والثلاثة ألآف والخمسة ألاف هي سبائك ذات كميات متدنية من العناصر المضافة، ولذلك فإنها لا تستجيب للمعالجة الحرارية، في حين أن سبائك سلاسل الألفان والستة ألاف والسبعة ألاف فإنها قابلة للمعالجة الحرارية ويمكن تحسين الكثير من خواصها بهذه المعالجة.

والشكل (6-7) يوضح مخطط طرق المعالجة الحرارية المختلفة للسبائك الصناعية، وهي كما يأتي:

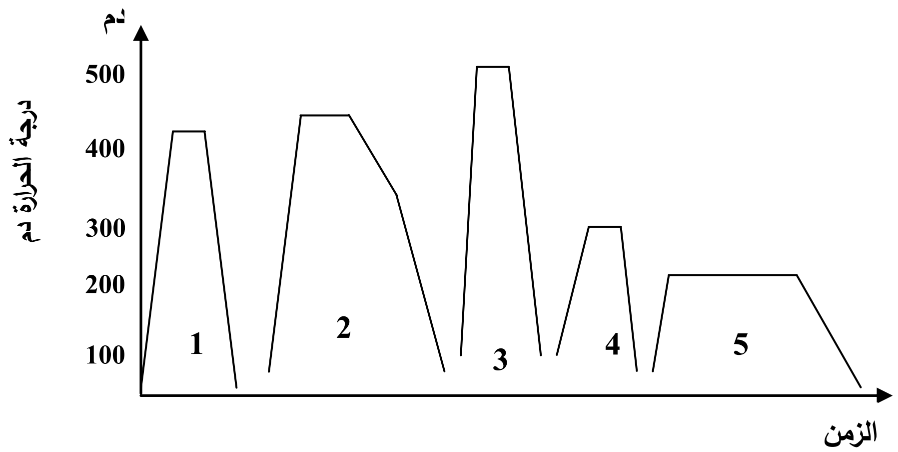
1 : تلدين للتخلص من الإجهادات الداخلية الناتجة عن التشكيل على البارد.

2 : تلدين لتخفيض صلادة السبيكة وذلك عقب التقسية بمعالجة المحلول الجامد.

3 : التقسية بمعالجة المحلول الجامد.

4 : إزالة الإجهادات الداخلية بالمعدن.

5 : التعتيق الصناعي.



شكل(6-7) المعالجات الحرارية المختلفة لسبائك الألومنيوم.

مثال:

ما هو تصنيف السبيكة : 7075-T6

سبيكة الومنيوم 7xxx تحتوي على خارصين (Zinc) كمعدن أساسي بالإضافة إلى الخارصين والنحاس.

T6 : التقسية بمعالجة حرارية للمحلول الجامد ثم التعتيق الصناعي أي تسخين المعدن إلى درجة ما بين 400–480 درجة مئوية والتبريد السريع في الماء

لتحسين خواص السبيكة (Immunity to IGC, SCC, and Exfoliation)، يلي ذلك التعتيق الصناعي الذي يتضمن تسخين المعدن إلى درجة حرارة من 130 إلى 190 دم لبضعة ساعات ثم التبريد في الهواء الجوي.

2.2.6 سبائك الماغنيسيوم:

يعتبر معدن الماغنيسيوم منافساً للالومنيوم في العديد من الخواص والإستعمالات، فلقد إنصب إهتمام العديد من الصناعات على معدن الماغنيسيوم في السنوات الأخيرة بسبب خفة وزنه، فالماغنيسيوم له ثلثي كثافة الالومنيوم وأقل من ثلث كثافة الحديد، ولذلك فإن مسبوكات الماغنيسيوم قد تم إستخدامها بديلا عن سبائك الألومنيوم في العديد من المجالات مثل صناعة أجزاء السيارات والطائرات والأجهزة المحمولة.

إلا أن ما يؤخذ على الماغنيسيوم وسبائكه أمران مهمان وهما، أن سبائك الماغنيسيوم معرضة للتآكل، ولذا تحتاج إلى وسائل الحماية منه، وألامر الثاني أن معظم سبائك الماغيسيوم لا تتحمل درجات الحرارة العالية، أي أنها ذات مقاومة ضعيفة للتزحف، وهذا يحد كثيراً من استعمالاتها، بالمقابل هنالك بوادر صناعة سبائك جديدة تتحمل الحرارة إلى ما يقارب 200 دم.

1.2.2.6 تصنيف سبائك الماغنيسيوم:

يختلف تصنيف سبائك الماغنيسيوم كثيراً عن نظيره الألومنيوم، حيث يستعمل نظام أحرف يدل كل منها على العنصر المضاف، ويلي ذلك عدة أرقام تدل على

نسبة العناصر بالسبيكة على التوالي وذلك من اليسار إلى اليمين، والجدول(6-3) يبين معظم العناصر الصناعية المضافة إلى سبائك الألومنيوم.

A: aluminium, K: zirconium, M: manganes,
E: reare earths, Q: silver, S: silicon,
H: thorium, Z: zinc, T: tin,

ومن ناحية أخري فإن سبائك الماغنيسيوم تتبنى الحروف والأرقام المستعملة في المعالجة الحرارية للألومنيوم، مثل (T2 - T6) وتتبع هذه الحروف والأرقام تصنيف السبيكة السابق ذكره.

فمثلاً السبيكة AZ92D-T2 تعني سبيكة ماغنيسيوم تحتوي على 9% الومنيوم و2% خارصين (Zinc) وهي التصميم والتصنيع الثالث لهذه السبيكة (D) ولقد أقيم على هذه السبيكة تلدين أي التبريد البطئ (T2).

2.2.2.6 تأثير العناصر المضافة على الماغنيسيوم:

خلال الثلاثين سنة الماضية تم إضافة العديد من العناصر إلى الماغنيسيوم لأجل الحصول على سبائك خفيفة الوزن وذات خواص ميكانيكية جيدة. ولقد تم الحصول على أطوار مختلفة للبنية الداخلية للمعدن، والتي تؤثر كثيراً على خواص السبيكة، فمنها ما يمتاز بدرجة إنصهار عالية ويعزز تحمل السبيكة لدرجات الحرارة العالية مثل الأطوار التي يوجد بها السليكون أو الكالسيوم أو القصدير أو المعادن النادرة، ومنها ما يزيد من قوة الشد والصلابة مثل الأطوار التي يتوفر بها الألومنيوم والخارصين والزركونيوم والسليكون والنحاس، بل أن البعض منها يمكن أن يعطي سبائك ذات بلورات وسطية أو سطحية الأمر الذي يفتح باب تصنيع سبائك الماغنيسيوم الطروق، والجدول(6-4) يوضح أهم العناصر المضافة والأطوار التي

يمكن الحصول عليها. وتنقسم العناصر المضافة إلى مجموعتين، الأولى تلك التي أستخدمت لسنوات عديدة، والمجموعة الثانية معظمها حديثة العهد أو لازلت قيد البحث والدراسة.

جدول (6-4) العناصر المضافة إلى الماغنيسيوم والأطوار التي يمكن الحصول عليها.

المجموعة	المعدن المضاف	الأطوار المترسبة ودرجة حرارة إنصهارها (دم)
الأولى	Al	$Mg_{17}Al_{12}$ (bcc 455)
	Mn	Mn-Al-Fe, Mn-Al-Cu (in presence of Al and Fe or Cu)
	Zn	$MgZn_2$, $MgZn_3$, β-Mg_7Zn_3
	Si	Mg_2Si (1085)
الثانية	Ce	$Mg_{12}Ce$, $Mg_{12}(La_{.43}Ce_{.5})$, Al_2Ce: (1480)
	Sb	Mg_3Sb_2 (1228)
	Ca	Al_3Ca (fcc 1079)
	Sc	MgSc, Mg_2Sc
	Nd	Mg_3Nd, $Mg_{12}Nd$
	Gd	MgGd
	Th	Mg_3Th, Mg_2Th , $Mg_{23}Th_6$

ولعل السبائك التي تحتوي على الماغنيسيوم والألومنيوم والخارصين من أكثر السبائك التي أشبعت بحثا ودراسة، فلقد وجد أنها تحتوي على طورين هما طور ألفا المحتوي على ماغنيسيوم ذو البلورات السداسية وطور بيتا الذي يتكون من مركب الألومنيوم والماغنيسيوم ($Mg_{17}Al_{12}$) على شكل بلورات وسطية، وهذا يترسب عادة بين الحبيبات بنسبة تقارب 48 إلى 52 % من المسبوكة وله درجة انصهار أقل من درجة إنصهار المعدن.

ولقد وجد أن طور بيتا مع وجود الخارصين يزيد كثيراً من صلابة وصلادة مسبوكات الماغنيسيوم، ويجعلها تستجيب كثيراً للمعالجة الحرارية، كما يمثل طور بيتا الجزء المصعدي من المعدن، ولذا يتآكل قبل غيره من الأجزاء.

3.2.2.6 الخواص الميكانيكية لمسبوكات الماغنيسيوم:

تنحصر سبائك الماغنيسيوم المستخدمة حالياً على الأنواع المصنعة بالسباكة، وذلك أن الماغنسيوم الطروق لا يتوفر إلا على نطاق ضيق، بسبب طبيعة الماغنيسيوم المتواجد على شكل بلورات سداسية صعبة التشكيل على البارد.

وخلال الستينات من القرن الماضي تم تصنيع العديد من السبائك التي يدخل في تكوينها العناصر ذات التكلفة العالية مثل الفضة في السبيكة (QE22A) والمسبوكات التي يوجد بها المعادن النادرة مثل (Re = Ce,La,Nd,Pr) كما في السبيكة (WE42 & WE43) . وهذه المسبوكات لها خواص ميكانيكية جيدة وتم إستعمالها في صناعة أجزاء الطائرات وفي بعض أجزاء السيارات الفارهة مثل (BMW)، ولم يكن لها إنتشاراً كبيرا بسبب تكلفتها العالية.

المحاولة الأخرى الجديرة بالذكر في تلك الحقبة من الزمن هي إستعمال الثوريوم لصناعة سبائك تتحمل درجات الحرارة العالية، مثل السبيكة (HK31A) التي تعتبر من أفضل سبائك الماغنيسيوم من الناحية الميكانيكية والتي أستخدمت في مجال الطيران، إلا أن الثوريوم ذو خواص إشعاعية ضارة بالصحة مما حال دون الاستمرار في إستخدامه.

ولقد تم حديثا إستخدام العديد من المسبوكات في شتى المجالات الصناعية والتي تتركز على مجموعتين رئيسيتين وهما:

مجموعة سبائك الماغنيسيوم والألومنيوم مثل (AM50 & AM60) وهذه السبائك تتصف بسهولة السباكة والتشغيل على الألآت مع خفة الوزن، إلا أنها قليلة المقاومة للتزحف، أي أنها لا تستعمل عند درجات الحرارة التي تتجاوز 120 دم.

والمجموعة الأخرى تلك التي تحتوي على الماغنيسيوم والألومنيوم والخارصين، وهذه يتواجد بها كمية كبيرة من الألومنيوم مثل السبيكة الأكثر إستخداماً (AZ91D) التي تتميز بصلابة جيدة وقوة شد عالية، مع مقاومة لدرجات الحرارة حتى 180 دم ومقاومة مقبولة للتآكل بسبب إضافة الخارصين الذي يقلل من التآكل الموضعي.

ولقد أستخدمت هذه المسبوكة حديثا في العديد من المجالات، منها صناعة هياكل أجهزة الحاسب المحمول والهواتف المحمولة والأجهزة الكهربية والاليكترونية الخفيفة، وكبديل لسبيكة الألومنيوم (A380) في صناعة قطع غيار السيارات مثل غلاف صندوق السرعات والمقود والعجلات وبعض أجزاء محركات السيارات وغيرها.

ومن مزايا سبائك الماغنيسيوم أنها يمكن وصلها بالعديد من الطرق مثل اللحام بالقوس الكهربي واللحام الاندماجي واللحام الموضعي والكهربائي.

جدول(6-5) يوضح الخواص الميكانيكية لبعض مسبوكات الماغنيسيوم.

Alloy	Comp (%)	TS (MPa)	YS (MPa)	El (%)	ρg/cm3
AZ91D	9Al,0.7Zn, 0.17-.4Mn	230	160	3	1.81
AM60B	6Al,0.2Zn, 0.15-.5Mn	220	130	6-8	1.78
AM50A	5Al,0.2Zn, 0.28-.5Mn	220	110	6-10	1.78
AM20	2Al,o.23Mn	210	90	12	1.78
RZ5	4.2Al,1.2Re,0.7Zr	218	148	4	1.78
MEZ	2.5Al,1.2Re,0.35Zn	172	145	5	1.78
ZAC8506	8Zn,5Al,0.6Ca	219	146	5	1.8
AMC5006	5Al,0.6Ca,0.32Mn	156	95	8.5	1.78
MRI 151		277	175	7.5	
MRI 177	Under patient process	275	177	6.7	
Noranda-A1		202	145		
A380	9Si,3.5Cu,3Zn,2Fe	324	160	3.5	2.68

ومن السبائك الحديثة الواعدة تلك التي تحتوي على عنصر الكالسيوم بالإضافة إلى الألومنيوم والمنجنيز، مثل السبيكة (ZAC8506) و (AMC5006) ، وهذه السبائك لها قوة شد عالية نسبيا، ومقاومة جيدة للحرارة العالية، ويرجع ذلك إلى تكوين مركب الألومنيوم والكالسيوم (Al_2Ca) الذي يحول دون تكوين طور بيتا ويتصف بدرجة إنصهار عالية ومقاومة جيدة للتآكل.

ولقد تم أخيرا إضافة العديد من العناصر إلى الماغنيسيوم لزيادة مقاومة التزحف ومقاومة التآكل، وتحسين الخواص الميكانيكية ألأخرى، ومن هذه العناصر المضافة؛ الليثيوم والأنتيمون والسكانديوم واليوتيريوم وغيرها، إلا أن معظم سبائك هذه العناصر لازالت قيد البحث والدراسة.

3.2.6 سبائك النحاس:

يمتاز النحاس دون غيره من المعادن الصناعية بتوصيلة عالية للحرارة والكهرباء، وبسهولة التشكيل والتشغيل على الالات، وقوة شد مناسبة مع مقاومة جيدة للتآكل بالإضافة إلى أن النحاس غير مغنطيسي ويمكن وصله بالعديد من طرق اللحام. ولقد استخدم النحاس وسبائكه مثل النحاس الأصفر والبرونز مند أكثر من ثلاثة ألآف سنة وخاصة في الحضارات الهندوسية واليابانية والصينية، بل أن بعض تماثيل تلك الحقبة من الزمن لازال ماثلاً للعيان.

1.3.2.6 تصنيف سبائك النحاس:

لقد وضعت جمعية تطوير النحاس الأمريكية نظاما للتصنيف وتبنته الكثير من الهيأت الدولية ذات العلاقة، وهذا التصنيف يرتكز على أن النحاس الطروق قد أعطي أرقام من 10100 إلى 79900 و مسبوكات النحاس من 80000 إلى

99900 مع بادئة بحرف (C) لجميع السبائك، والجدول(6-6) يبين المجموعات الرئيسية لسبائك النحاس والعناصر المضافة لكل منها.

جدول(6-6) مجموعات سبائك النحاس.

المجموعة	العناصر الأساسية المضافة
C 1xxxx	Cu 99.3 %
C 2xxxx	Cu-Zn (brass)
C 3xxxx	Cu- Zn-Pb
C 4xxxx	Cu-Zn-tin
C 5xxxx	Cu-tin (bronze)
C 6xxxx	Cu-Al, Cu-Si
C 7xxxx	Cu-Ni/Zn
C 8xxxx	Cast: Cu, brase,Cu-Zn-Si
C9xxxx	Cast: Cu-tin, Cu-tin-Pb,Cu-tin-Ni

2.3.2.6 أنواع سبائك النحاس:

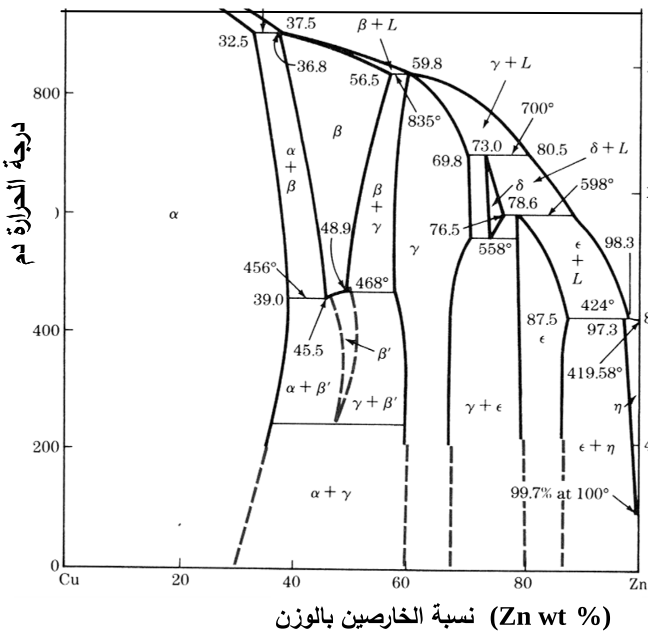
يستخدم النحاس بنوعية النقي وعلى شكل سبائك على نطاق واسع في العديد من النواحي الصناعية، وتضاف عناصر المجموعات السابقة للحصول على خواص ميكانيكية جيدة، والجدول (6-7) يوضح أهم سبائك النحاس وخواصها الميكانيكية.

1- النحاس النقي:

تحتوي سلسلة عشرة الآف (C1xxxx) على نحاس نقي بما يتجاوز 99.93 %، وتمثل السبيكة (C10100) التي تحتوي على 99.99 % نحاس مثالاً للمعدن الأكثر نقاً، وتستعمل سبائك هذه المجموعة في التوصيلات الكهربية مثل الكوابل المزدوجة ومقوم التيار (Rectifier) وفي صناعة قطع الترانزستور والأجهزة الكهربائية الأخرى.

2- سبائك النحاس الأصفر (Brass):

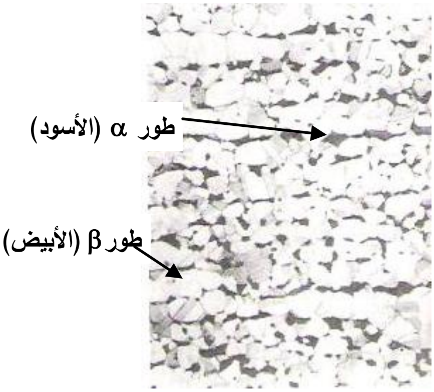
تنتمي مجموعة النحاس الأصفر (Brass) إلى سلسلة العشرين ألف (C2xxxx) والتي تحتوي على 5 إلى 40 % خارصين. وحيث أن حجم ذرات عنصر الخارصين كبيرة، فإن النحاس يكون محلولا جامداً مع الخارصين بالإحلال حتى تركيز 35 %، وما بعد هذا التركيز ينفصل إلى طورين α و β ، والشكل **(6-8)** يوضح مخطط إتزان النحاس والخارصين، كما أن الشكل **(6-9)** يبين التركيب المجهري لطوري α و β ، في سبائك النحاس الأصفر.

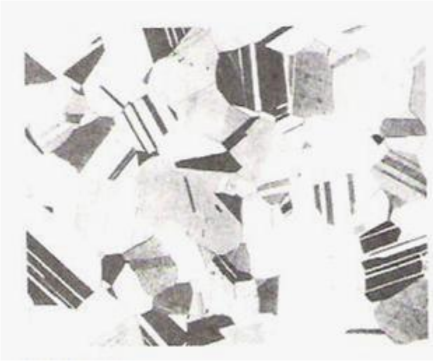


شكل(6-8) مخطط إتزان النحاس والخارصين.

ولقد تم وتصنيع العديد من سبائك النحاس الأصفر بنسب مختلفة من الخارصين، وأكثر السبائك إستعمالاً في هذه المجموعة السبيكة (C 26000) التي

تحتوي على 70 % نحاس و30 % خارصين، والتي تستعمل لصناعة هياكل قطع الدخيرة والأقفال والمبادلات الحرارية. والسبيكة (C28000) المكونة من 60 % نحاس و 40 % خارصين، تستعمل في صناعة المبادلات الحرارية وصناعة القلاوود وأقطاب اللحام بالنحاس.





طور α و β في سبيكة 40% خارصين   **طور α في سبيكة 30% خارصين.**

الشكل (6-9) التركيب المجهري لسبيكتي نحاس أصفر تحتوي الأولى علي 30% خارصين ومقام عليها تلدين وتحتوي الثانية على 40 % خارصين مع التشغيل على البارد، (1: 75x).

1- سبائك البرنز(Bronze):

يعتبر البرونز من أقدم السبائك المستعملة على وجه البسيطة، بسبب وجود خاماته في الطبيعة وسهولة تشكيله. وينتمي البرونز إلى مجموعة الخمسين ألف (C5xxxx) التي تحتوي على 1 إلى 11 % قصدير وقد يضاف الفسفور بنسبة 0.1- 0.5 % ويسمى في هذه الحالة بالبرنز الفوسفوري.

وللبرنز عدة خصائص مهمة، منها مقاومة الشدة الكبيرة والصلابة لعالية ومقاومة جيدة للتآكل، بل يعتبر البرونز أفضل من النحاس الأصفر في مقاومته للظروف الجوية، ويتصف كذلك بمعامل منخفض للاحتكاك، لذا يستعمل البرونز في

صناعة الكوابح (Breaks). وللبرونز معامل مرونة كبير، مما جعله مناسبا لصناعة وسائد التمدد في خطوط الأنابيب (bellows) والنوابض (Springs)، إلا أن ما يحد من إستعمال البرونز هو التكلفة العالية للنحاس والقصدير. كما يضاف الرصاص بنسبة تقارب 5 إلى 10 % لتحسين التشغيل على الالات وزيادة مقاومة الإحتكاك، وتستعمل هذه السبائك في صناعة عنفات المضخات والتروس والصمامات.

جدول(6-7) سبائك النحاس الصناعية وخواصها الميكانيكية.

alloy	Wt %	Condition	TS(MP)	YS(MP)	El(%)
C10100	99.99 Cu	Annealed	220	69	45
		Cold-worked	345	310	6
C11000	99.9Cu ,	Annealed	220	69	45
	0.04 O	Cold-worked	345	310	6
C26000	70Cu ,	Annealed	325	105	62
	30Zn	Cold-worked	525	435	8
C28000	60Cu ,	Annealed	370	145	45
	40Zn	Cold-worked	485	345	10
C17000	99.5Cu,1.7	Annealed	410	190	60
	Be, 0.2Co	Cold-worked	1240	1070	4
C61400	95Cu,7Al,	Annealed	550	275	40
	2Fe	Cold-worked	615	415	32
C71500	70Cu ,	Annealed	380	125	36
	30Ni	Cold-worked	580	545	3
C80500	99.75 Cu	As-cast	172	62	40
C82400	96.4Cu,1.7	As-cast	497	255	20
	Be, 0.25Co	Heat-treated	1035	966	1
C83600	85Cu,5Sn, 5Pb,5Zn	As-cast	255	117	30
C87200	89 Cu,4Si	As-cast	379	172	30
C90300	93Cu,8Sn. 4Zn	As-cast	310	145	30
C95400	85Cu,4Fe,	As-cast	586	242	18
	11Al	Heat-treated	725	373	8
C96400	69Cu,30Ni,0. 9Fe	As-cast	469	255	28

3- سبائك النحاس والبريليوم:

تحتوي هذه السبائك على 0.6 – 2 % بريليوم بالإضافة إلى 0.2 -2.5 % كوبلت، ويمكن معالجة هذه السبائك حراريا مع التشغيل على البارد للحصول على مقاومة شد تصل إلى 1463 ميجا باسكال وهي أعلى قوة شد يمكن أن تصل إليها سبائك النحاس، وتستعمل هذه السبائك في صناعة العدد والصمامات والتروس إلا أنها ذات تكلفة عالية بالمقارنة إلى السبائك الأخرى.

4.2.6 سبائك النيكل:

يعتبر معدن النيكل من المعادن ذات الخواص الميكانيكية الجيدة مع مقاومة عالية للتآكل في آن واحد. فالنيكل له مقاومة شد عالية عند درجات الحرارة العادية والعالية، ويتكون من بلورات سطحية (FCC) بحيث يمكن تشكيله وتشغيله على الالات بصورة جيدة، كما أنه يقاوم التأكسد في الأوساط القلوية والمتعادلة وشبه المتعادلة. ومن ناحية أخرى يتصف النيكل بكثافة أكبر من الحديد حيث تبلغ 8.97 جم/سم3، ويعتبر باهظ الثمن مقارنة بالمعادن الصناعية الأخرى.

ويستعمل النيكل النقي 99 % في صناعة ملفات التسخين لسخانات المياه المنزلية والصناعية، كما يضاف العديد من المعادن الصناعية إلى سبائك النيكل لتحسين خواصها أو تخفيض تكلفتها، ومن هذه المعادن الحديد والكروم والسليكون والموليبدنيوم والمنجنيز والألومنيوم والنحاس.

1.4.2.6 خواص سبائك النيكل:

رغم وجود عدة تصنيفات لسبائك ومسبوكات النيكل مثل تصنيف الجمعية الأمريكية لاختبار المواد (ASTM) وتصنيف (UNS)، إلا أن إستعمالهما قليل من

الناحية الصناعية، ويغلب على تصنيف سبائك النيكل الأسماء التجارية مثل المونيل والإنكانال والإنكالوي وغيرها.

1- سبائك النيكل والنحاس (Monel):

يضاف النحاس الذي يذوب بكميات كبيرة في النيكل لتحسين الخواص الميكانيكية وتخفيض ثمن السبائك. وتمتاز هذه المجموعة بخواص ميكانيكية جيدة، حيث أنها لها صلابة وقوة شد أكبر من النحاس الأصفر وأقل من الصلب، ومقاومة جيدة للعوامل البيئية في درجة الحرارة العادية والمرتفعة، كما أن لهذه السبائك مقاومة عالية للكلال والتزحف.

وتحتوي سبائك المونيل على 66 % نيكل و 31 % نحاس (Monel 500) وقد يضاف كميات قليلة من الألومنيوم بنسبة 3 % و التيتانيوم بنسبة 0.6 % للحصول على سبيكة مونيل ك . 500 (Monel k-500)، وهذه السبيكة تعالج حراريا وذلك بالتعتيق لمدة أربعة ساعات عند درجة حرارة 740 د م للحصول على قوة شد عالية ومقاومة للتآكل جيدة.

ويعزي الزيادة الكبيرة لمقاومة الشد للسبيكة ك 500 إلى تكوين وترسيب طوري مركبات النيكل والألومنيوم (Ni_3Al) والنيكل والتيتانيوم (Ni_3Ti)، وتستعمل هذه السبيكة في صناعة تجهيزات الطائرات ومحاور المضخات وكرات كراسي التحميل والنوابض (Springs) .

والسبيكة الأخرى كونستانتن (Constantan) تحتوي على 45 % نيكل و 55% نحاس ولها مقاومة عالية للحرارة، وتستعمل في صناعة الإزدواج الحراري وأجهزة قياس الحرارة الأخرى (Thermo Couples).

2- سبائك النيكل والكروم والحديد (Inconel):

تتركب معظم سبائك هذه المجموعة من 76 % نيكل و 16 % كروم و 8 % حديد وتجمع في ميزاتها بين قوة الشد والصلابة العالية من النيكل، ومقاومة التآكل وتحمل درجات الحرارة العالية من الكروم، وتستعمل هذه السبيكة كثيراً في صناعة أنابيب العادم في محركات الطائرات وتطبيقات درجات الحرارة العالية.

3- سبائك النيكل والمولبيدنيوم والكروم والحديد (Hastelloy):

معظم سبائك هذه المجموعة تتحمل درجات الحرارة العالية كما أنها مقاومة للأحماض، ولذا تستعمل في المنشآت الصناعية .

ومن هذه المجموعة هستالوى إكس (Hastelloy X) ويحتوى على 47 % نيكل و 9 % موليبدنيوم و 22 % كروم و 18 % حديد ولهذه السبيكة مقاومة عالية للتأكسد حتى درجة 1200 د م وتستعمل في تجهيز الأفران وبعض الأجزاء من الطائرة التي تتعرض إلى درجات الحرارة العالية مثل ريش التربينات وأنابيب العادم في المحرك النفاث .

4- سبائك النيكل والالومنيوم والكوبلت والحديد (Alnico)

تصنف هذه المجموعة ضمن سبائك النيكل رغم وجود كميات كبيرة من الحديد بها، وتتفاوت مكوناتها ما بين 8- 12 % الومنيوم و 14-28 % نيكل و5-35 % مولبيدنيوم والباقي حديد. ولهذه المجموعة خواص مغناطيسية جيدة وتستعمل عادة في صناعة الأجزاء المغناطيسية الدائمة في المولدات الكهربية وأجهزة الاتصال وغيرها .

2.4.2.6 السبائك الممتازة (Super alloys)

لقد تم إستحداث مجموعة السبائك الممتازة بعد بحث طويل خلال الستينات من القرن الماضي لإيجاد سبائك مقاومة لدرجات الحرارة العالية والتي يمكن إستخدامها لتصنيع أجزاء التربينات الغازية وذلك لإتاحة عمل هذه التربينات عند درجات الحرارة العالية ما بين 815 و 1095 درجة مئوية.

وتستعمل هذه المجموعة عند درجات الحرارة العالية لسببين رئيسيين:-

1- مقاومة جيدة للتأكسد (Oxidation resistance).

2- مقاومة جيدة للتزحف (Creep resistance).

ويلاحظ أن ما عدا السبيكة (1818) HF التي تتكون معظمها من الحديد فإن السبائك الأخرى تحتوي على كمية كبيرة من النيكل بما يساوي 50-60 %، والكروم 15-20 %، والكوبلت 15- 20 %، بالإضافة إلى الالومنيوم 1- 4 %، والتيتانيوم 2- 4 %، ولهذه السبائك بنية مكعبة سطحية وتستمد قوتها ومقاومتها من النيكل الذي يكون على شكل أوستينيت (γ) والكروم المقاوم للتأكسد والكوبلت الذي يحل محل الحديد أو النيكل في بعض البلورات لتكوين محلول يزيد في قوة المعدن.

كما أن الالومنيوم والتيتانيوم لهما ذرات رفيعة تتفاعل مع النيكل لتكوين مركبات النيكل والآلومنيوم مثل Ni_3Al الذي يتم ترسيبه بين الذرات أو كإحلال فيزيد من قوة المعدن.

5.2.6 سبائك التيتانيوم:

يعتبر معدن التيتانيوم العنصر الأحدث من حيث الاستخدام، حيث أكتشف في سنة 1791 م ، ولم يستخدم صناعيا حتى الأربعينات من القرن الماضي، ورغم وجود التيتانيوم في الطبيعة بكميات كبيرة علي شكل أكسيد التيتانيوم إلا أن أستخراجه

وأستعماله كان بطيئا بسبب نشاطه ومقدرته على تكوين مركبات كثيرة ليس لها أهمية، وتكلفته العالية، مما يقلل من منافسته لسبائك العناصر الأخرى.

ويمتاز التيتانيوم النقي بدرجة انصهار عالية تقارب 1671 دم وكثافة تساوي 4.5 وقوة شد كبيرة (662 MP)، وبذلك يكون التيتانيوم من المعادن الخفيفة المنافسة للألومنيوم. ويتكون التيتانيوم من بلورات سداسية (α) عند درجة الحرارة العادية ، وعند تسخينه عند درجة حرارة أكبر من 882 دم يتحول إلى بلورات وسطية، وهذا يجعل سبائك التيتانيوم قابلة للتقسية بالمعالجة الحرارية.

تصنيف سبائك التيتانيوم:

رغم وجود تصنيف من الجمعية الأمريكية لإختبار المواد تحت رقم (B 265 Grade x)، إلا أن الصناعة كثيراً ما إعتمدت على استعمال العناصر والأرقام الدالة على السبيكة، فمثلا السبيكة (Ti-6Al-4V) تعني أن سبيكة التيتانيوم تحتوي على 6 % الومنيوم و 4 % فاناديوم، وهكذا بالنسبة للسبائك ألأخرى. ولعل هذه السبيكة تعتبر من أهم سبائك التيتانيوم، حيث تتصف بقوة شد عالية وسهولة التشكيل، وعند معالجة محلولها الجامد عند 953 دم تم تعتيقها صناعيا عند درجة حرارة 538 دم لعدة ساعات، يمكن الحصول على قوة شد تناهز 1173 ميجاباسكال.

أما سبيكة التيتانيوم المحتوية على 1 % ألومنيوم، 8 % فاناديوم، 5 % حديد، فإن معالجة محلولها الجامد ثم تعتيقها صناعيا، يزيد قوة الشد لها إلى 1448 ميجاباسكال، فإذا قسم هذا المقدار على الكثافة، فإن هذه السبيكة تعطي قوة نوعية (Specific Strength) أكبر من أي سبيكة صناعية أخرى.

ولذلك نرى أن سبائك التيتانيوم تستعمل لغرضين أساسين وهما:

1- قوة نوعية عالية.   2- مقاومة جيدة للتآكل.

أسئلة الفصل السادس

1. مما يتركب حديد الزهر وما هي أهم خواصه.
2. ما الفرق بين مكونات وخواص حديد الزهر الأبيض والرمادي.
3. على أي أساس يتم تقسيم سبائك الصلب الكربوني.
4. مما تتكون سبائك الصلب الكربوني الآتية:
5. ما تأثير إضافة الكروم على سبائك الصلب الكربوني.
6. مما يتكون صلب السرعات العالية وما هي أهم خواصه.
7. قارن بين أداء قلم خراطة مصنوع من صلب عالي الكربون وآخر مصنوع من صلب السرعات العالية.
8. أذكر الحد الأدنى للكروم في سبائك الصلب المقاوم للصداء
9. ما هي الخواص العامة للصلب المقاوم للصداء.
10. أذكر مكونات الصلب المقاوم للصداء من نوع الأستنيت والفيريت، وخواص كل منها.
11. ما الذي يجعل الصلب المقاوم للصداء مقاوماً جيداً للتآكل.
12. وضح تأثير النيكل على طور الاستينيت في الصلب المقاوم للصداء.
13. ما هي الخواص التي يمتاز بها معدن الألومنيوم عن غيره.
14. أذكر المعادن المضافة للسلسلة ألفان والسلسلة سبعة ألآف مع توضيح خواصهما.
15. ما هي مجموعات الألومنيوم التي تتصف بخواص ميكانيكية جيدة.
16. أذكر خطوات التعتيق الطبيعي والصناعي لسبائك الألومنيوم.
17. كيف يتم تصنيف سبائك الماغنيسيوم، وما هو تركيب السبيكة AZ91D
18. ما هي الخواص التي تجعل الماغنيسيوم منافساً جيداً للألومنيوم.

19. ما هي العيوب الأساسية في سبائك الماغنيسيوم.
20. بين مكونات طوري ألفا وبيتا في سبائك الماغنيسيوم.
21. وضح الخواص العامة للنحاس.
22. أذكر مكونات النحاس الأصفر وتأثير المواد المضافة على طوري ألفا وبيتا بالسبيكة.
23. ما هي مكونات و خواص سبائك البرونز.

الفصل السابع

المواد البلاستيكية

تعتبر اللدائن من المواد المهمة هندسيا لعدة أسباب منها أن هذه المواد لها خواص متعددة قلما توجد في الأنواع الأخرى مثل خفة الوزن، والمقاومة الجيدة للاحتكاك والضجيج، بالإضافة إلى العزل الحراري والكهربي، وإمكانية تصنيع أشكال معقدة وذات تشطيب نهائي جيد في خطوة واحدة، وأكثر من ذلك إنخفاض التكلفة للمواد الخام وأساليب التصنيع.

ويزداد إستخدام المواد البلاستيكية عام بعد عام على حساب المواد التقليدية الأخرى مثل الصلب والخشب، فمثلا إزداد إستعمال المواد البلاستيكية في صناعة السيارات من 10– 15 % في سنة 1978 إلى ما يقارب 30 % في سنة 1990. وبالمثل تستعمل هذه المواد في جميع مناحي الحياة الأخرى مما يؤكد النمو الكبير الذي ستشهده لعقود قادمة.

1.7 أنواع المواد البلاستيكية:

تتركب المواد البلاستيكية بشتى أنواعها من بوليميرات تنتظم في سلاسل طويلة أو متقاطعة، وتعني كلمة بوليمر في اللاتينية متعدد الأجزاء ويوضح ذلك أن كل مركب يحتوي على العديد من الوحدات أو الأجزاء المترابطة مع بعضها البعض بروابط عادة ما تكون تساهمية لتكوين مواد صلبة.

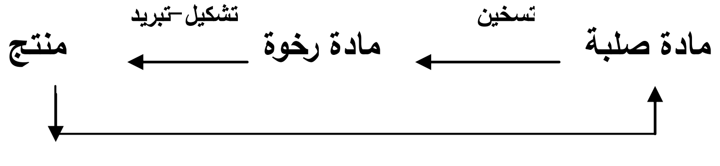
في هذا الفصل سيتم إستعراض التركيب الكيميائي والخواص الفيزيائية والميكانيكية لمجموعتين مهمتين من البليميرات، وهي المواد البلاستيكية والمواد

المطاطية. وتنقسم المواد البلاستيكية إلى نوعين رئيسيين وهما، اللدائن الحرارية (Thermoplastics) واللدائن المتصلبة بالحرارة (Thermosetting plastics)، كما أن المجموعة المطاطية تشتمل على العديد من البليميرات التي تتصف بالمرونة الكبيرة (Elastic) عند تعريضها إلى قوة خارجية.

1.1.7 اللدائن الحرارية (Thermoplastics):

تتكون اللدائن الحرارية من سلاسل طويلة من الكربون والهيدروجين بالإضافة إلى بعض العناصر الأخرى مثل الأكسجين والنيتروجين والكبريت، وترتبط هذه العناصر مع بعضها بروابط تساهمية، كما أن التفريعات في السلسلة الفرعية عادة ما ترتبط بالرئيسية عن طريق رابطة تساهمية زوجية.

وتحتاج اللدائن الحرارية إلى حرارة لكي تصبح لدنة، أي رخوة قابلة للتشكيل، وبذلك يمكن حقنها في قوالب، وعندما يبرد المصهور يكتسب شكل القالب .ويمكن إعادة تسخين وإذابة الشغلة عدة مرات وصبها في قوالب دون التأثير على خواصها الفيزيائية أو الكيميائية أو الميكانيكية إلى حد كبير والشكل((1−7) يوضح خطوات تصنيع وإعادة تصنيع اللدائن الحرارية.



شكل((1−7) خطوات تشكيل وإعادة تشكيل اللدائن الحرارية.

2.1.7 اللدائن المتصلبة بالحرارة (Thermosetting plastics):

تتركب هذه المجموعة من شبكة ذات ثلاثة أبعاد من سلاسل هيدروكربونية تحتوي على الكربون والهيدروجين بالإضافة إلى عناصر أخرى كثيرة مثل النيتروجين والكلور والفلور والكبريت، و ترتبط مع بعضها البعض بروابط تساهمية.

يتم تكوين بليميرات هذه المجموعة عن طريق التفاعل الكيميائي بين مكوناته عند درجات حرارة تقارب 120 دم، بحيث يتم تشكيل أو حقن المصهور في قوالب، وعند تصلبه يأخذ شكلا نهائيا. والجدير بالذكر أن الشغلة المتحصل عليها لا تستجيب للصهر بالحرارة مرة أخرى بل تحترق عند رفع درجة حرارتها عن قيمة محددة.

2.7 تفاعلات البلمرة:

يتم تصنيع اللدائن الحرارية بعملية نمو سلاسل البوليميرات، وبهذه الطريقة يتم ربط ألآف من وحدات الجزيئات في سلاسل طويلة بروابط تساهمية، وتتكون وحدات الجزئيات (Monomer) عن طريق تكسير الرابطة التساهمية الزوجية في المركب الأصلي المصنع منه بإستعمال الحرارة والضغط أو بإستعمال محفز كيميائي.

وينتج عن التفاعلات السابقة تكسر الرابطة الزوجية والحصول على وحدات جزئ ذو اليكترونين في المدار الأخير قادران على المساهمة مع الوحدات الأخرى بروابط تساهمية فردية، وبذلك تتكون وتنمو السلاسل من الجانبين.

$$n\begin{bmatrix} H & H \\ I & I \\ C = & C \\ I & I \\ H & H \end{bmatrix} \xrightarrow{\Delta H} -\begin{bmatrix} H & H \\ I & I \\ C - & C \\ I & I \\ H & H \end{bmatrix}_n - \qquad (1-7)$$

وتعني(n) عدد وحدات الجزيئات قبل التفاعل وتساوي عدد الوحدات في جزئ البوليمر بعد التفاعل، وهو ما يعرف بدرجة البلمرة (Degree of Polymerization)، وتغرف إختصاراً (DP) وهي في حالة بولي إثيلين ما بين 3500 إلى 25000 وحدة، ويعبر ذلك عن الوزن الجزئي الذي يكون ما بين 10000 و 700000 جرام لكل مول.

$$DP = \frac{MP}{Mm} \qquad (2-7)$$

حيث أن:

DP : درجة البلمرة (وحدة بوليمر / مول).
MP : الوزن الجزيئي للبوليمر (جرام/مول).
Mm : الوزن الجزيئي لوحدة البوليمر (جرام/مول).

مثال:

إذا كان الوزن الجزيئي لبوليمر بولي إثيلين يساوي 150000 جرام/مول. أوجد درجة البلمرة لهذا البوليمر.

الحل

تحتوي وحدة جزئ بولي إثيلين علي 4 ذرات هيدروجين وذرتان كربون وبذلك يكون الوزن الجزيئي لوحدة بولي إثيلين 28 جرام/مول.

$$DP=\frac{150000 \quad g/mol}{28 \quad g/mol} \qquad =5357 \quad mers/mol$$

أي أن عدد الوحدات الجزئية تساوي 5357 وحدة/مول.

ومن المعروف أن تفاعلات البلمرة عادة ما تحدث ضمن ثلاثة مراحل تحدد ظروف بداية التفاعل وإستمراره ثم توقفه، وتعتمد هذه التفاعلات على العديد من المتغيرات مثل درجة الحرارة والضغط وتركيز المحفز وطبيعة المادة الخام.

1. المرحلة الابتدائية:

تحتاج معظم تفاعلات البلمرة إلى مواد محفزة لتزيد من سرعة وكفاءة التفاعل، وبذلك تزداد الإنتاجية، ففي حالة بولي إيثيلين يستعمل شق طليق (Free radical) من فوق أكسيد الهيدروجين الناتج من تكسر الرابطة الزوجية التساهمية، وبالمثل يمكن الحصول على شق طليق من العديد من فوق أكسيد المواد العضوية:

فوق أكسيد الهيدروجين

$$H-O-O-H \xrightarrow{\Delta H} 2H-O\bullet$$

فوق أكسيد عضوي

$$R-O-O-R \xrightarrow{\Delta H} 2R-O\bullet$$

ويمكن لهذا الشق الطليق أن يتفاعل مع وحدات البليميرات (كمواد خام) لتكسير الرابطة الزوجية وتكوين نواة لسلسلة يتم نموها بتواجد وحدات أخرى.

$$
R-O\bullet + \begin{bmatrix} H & H \\ I & I \\ C & = C \\ I & I \\ H & H \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{matrix} & & & H & H \\ & & & I & I \\ R-O & - & & C- & C\bullet \\ & & & I & I \\ & & & H & H \end{matrix} \qquad (3-7)
$$

2. المرحلة المتقدمة:

تستمر في هذه المرحلة تكسير إحدى الروابط الزوجية لوحدة المركب الكيميائي (في هذه الحالة الإيثيلين) وتكوين شق طليق جديد والذي له القدرة على الترابط مع نواة السلسلة والوحدات التي تتلوا ذلك بروابط تساهمية لتكوين سلاسل طويلة ، ويعتمد طول السلسلة على نوع المواد الخام المستعملة.

$$
R-CH_2-CH_2^{\bullet}+CH_2=CH_2 \rightarrow R-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2^{\bullet} \qquad (4-7)
$$

3. المرحلة النهائية:

ينتهي تكوين السلاسل لعدة أسباب منها إضافة شق طليق له القدرة على التفاعل مع الناحية النشطة من السلسلة، أو عن طريق تفاعل سلسلتين متجاورتين أو نضوب المادة المحفزة أو بسبب وجود شوائب.

$$
R(CH_2-CH_2)_m^{\bullet}+R'(CH_2-CH_2)_n^{\bullet} \rightarrow R(CH_2-CH_2)_m-R'(CH_2-CH_2)_n \qquad (5-7)
$$

ومن الملاحظ أن العديد من البوليميرات يمكن إنتاجها بالطريقة السابقة الخاصة بالإثيلين للحصول على بولي إثيلين، ولا تختلف عن بعضها سوى بتغيير أحد ذرات الهيدروجين بعنصر أو مركب عضوي آخر وذلك لإستحداث وحدات بوليميرية

جديدة عند تكسر الرابطة التساهمية الزوجية بها تكون وحدة أو جزئ قابل لتكوين سلاسل من البوليميرات كما يأتي:

$$n\begin{bmatrix} H & H \\ I & I \\ C & = C \\ I & I \\ H & H \end{bmatrix} \xrightarrow{\Delta H} -\begin{bmatrix} H & H \\ I & I \\ C & - C \\ I & I \\ H & R \end{bmatrix}_n - \qquad (6-7)$$

وبتغيير المجموعة (R) في المعادلة (5-7) بأي من العناصر أو المركبات الآتية يمكن الحصول على العديد من البوليميرات الصناعية المهمة وهي كما يأتي:

H : بولي إثيلين. Cl : بولي فينيل كلوريد.

CH_3 : بولي بروبيلين. C_6H_6 (حلقة البنزين): بولى ستيرين.

C=N : بولي أكريلونيتريل. CH_3-COO : بولي فينيل أسيتيت.

3.7 أنواع سلاسل البوليميرات:

1- بوليميرات متجانسة (Homopolymer):

البوليميرات المتجانسة عبارة عن سلاسل تحتوي على وحدات بوليميرية متكررة من نوع واحد. فإذا كانت وحدة البوليمر يرمز لها بالرمز (A)، فتكون سلسلة البوليمر علي الوجه الأتي:

AAAAAAAAAAAAAA

2- بوليميرات مشتركة:(Copolymers)

البليميرات المشتركة تحتوي على العديد من وحدات البليميرات المختلفة في النوع، كما يتم ترابطها بطرق متنوعة في سلاسل أو تفريعات، ومن الملاحظ أن بعض هذه التفريعات لها القدرة على التفاعل، إضافةً إلى تفاعلات السلسلة الرئيسية.

أ. بوليميرات مشتركة عشوائية:

وهذه البوليميرات لا يوجد لها ترتيب معين للوحدات المشتركة بل تتواجد بشكل عشوائي.

ABBABAAABABBAAB

ب. بوليميرات مشتركة ترددية:

في البوليميرات الترددية يكون هناك نسق محدد لتكرار الوحدات المشتركة.

ABABABABABAB

ج. بوليميرات مشتركة بمجموعات:

تشترك أكثر من مجموعة في هذه الحالة لتكوين مجموعة تتكرر في السلسة وقد تكون هذه المجموعات متكونة من العديد من الوحدات بترتيبيات مختلفة.

-------AAAAA-BBBBB-------

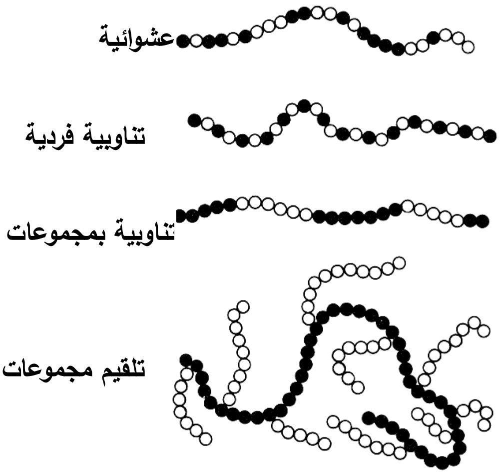
---AAAAA-CCCC-BBB-

د. بوليميرات ملقمة:(Grafted polymers)

يحدث تلقيم سلاسل فرعية بالسلسلة الأصلية لتكوين سلاسل متفرعة، وقد تلتحم نهاياتها لتكوين شبكة من البوليميرات المترابطة.

A A A A A A A A A A A A A A A A A
B B
B B
B B

والشكل(7−2) يوضح أهم أنواع إرتباط جزيئات سلاسل البوليمرات.



شكل(7−2) أنواع إرتباط ذرات وجزيئات البوليميرات.

4.7 الخواص الفيزيائية للدائن الحرارية:

1.4.7 حساب متوسط الوزن الجزيئي للبوليمرات الحرارية:

تحتوي البولمرات الحرارية علي سلاسل متعددة من البوليميرات ذات أطوال مختلفة، أي أن لكل منها وزن جزيئي مختلف، وبدلك فإن الوزن الجزيئي للبوليمر

يمكن حسابه من متوسط الأوزان الدرية والجزيئية لمكوناته كما هو مبين في المعادلة (1−7).

$$\overline{MP} = \frac{\sum f_i M_i}{\sum f_i} \qquad (1-7)$$

$\overline{MP}$: متوسط الوزن الجزيئي للبوليمر.

M_i : الوزن الجزيئي لنوعية واحدة من مكونات البوليمر.

f_i : نسبة الوزن الجزئي لنفس النوعية من البوليمر.

مثال:

خليط من مادة بلاستيكية تحتوي على 15% بالوزن بولي فينيل أسيتيت (PVA) و 85% بالوزن بولي فينيل كلوريد (PVC). أوجد نسبة عدد المولات لكلا المادتين.

الحل

بفرض أن الوزن الكلي للمادة البلاستيكية يساوي 100 جرام، فإن وزن بولي فينيل أسيتيت يساوي 15 جرام ووزن بولي فينيل كلوريد يساوي 85 جرام.

وبمعرفة الوزن الجزيئي يمكن حساب عدد المولات ونسبة كل منها في البوليمر:

$$PVA = 4x12 + 6x1 + 2x16 = 86 \ g/mol$$

$$PVC = 2x12 + 3x1 + 1x35.5 = 62.5 \ g/mol$$

إذن عدد المولات في 100 جرام من المادة تساوي:

$$\text{PVA} = 15/86 = 0.174 \text{ mol}$$

$$\text{PVC} = 85/62.5 = 1.36 \text{ mol}$$

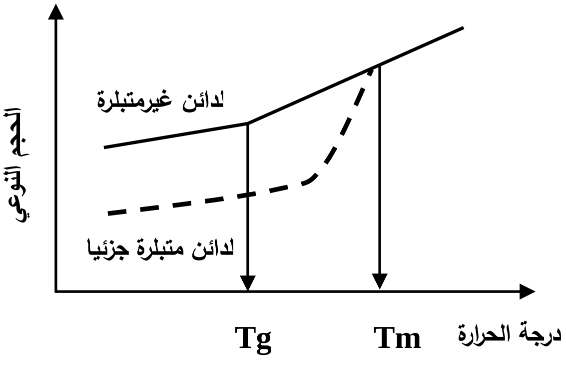
ونسبة عدد المولات لكل بوليمر تساوي:

$$PVA = \frac{0.174}{0.174 + 1.36} = 0.113 \text{ mol} = 11.3\%$$

$$PVC = \frac{1.36}{0.174 + 1.36} = 0.887 \text{ mol} = 88.7\ \%$$

2.4.7 تبلر اللدائن الحرارية:

عندما تخضع اللدائن الحرارية غير المتبلرة إلى تبريد بطئ من درجة الانصهار(Tm) (كما بالشكل (7-2))، يقابل ذلك تغيرا بطئا في حجمها النوعي (حجم/كتلة). عند درجة حرارة معينة يحدث تغيراً في ميل المنحنى وهذه الدرجة تسمى درجة إنتقال البريق (Glass transition temperature -Tg) . وتؤثر هذه الدرجة على الخواص الميكانيكية للبوليمر، بحيث يتميز البوليمر عند أعلى من هذه الدرجة باللدونة والمطيلية وسهولة التشكيل، في حين أن درجات الحرارة المنخفضة عن هذه الدرجة يكون فيها البوليمر صلد وهش أي قابل للكسر بسبب محدودية حركة سلاسل الجزيئات.

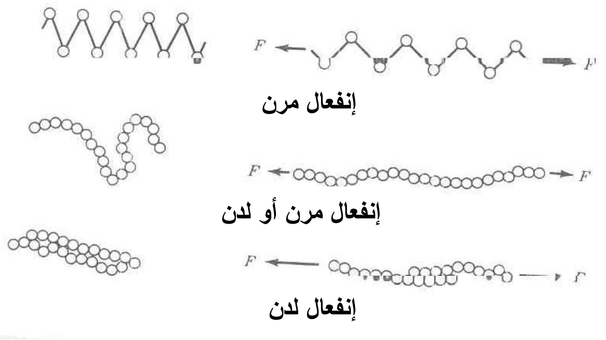


شكل(7–3) درجة الإنصهار ودرجة إنتقال البريق للدائن الحرارية.

أما البوليميرات المتبلرة جزئيا فان التغير في الحجم النوعي يكون فجائيا وأكثر وضوحا، وبمعدل أسرع من البوليميرات غير المتبلرة. والجدول (7-1) يبين درجات حرارة انتقال البريق لبعض البوليميرات.

3.4.7 تأثير الإجهاد على البوليميرات الحرارية:

تتأثر البوليمرات بالإجهاد تبعاً لخواصها الفيزيائية ودرجة الحرارة المعرضة له، فقد يؤثر الإجهاد تأثيراً مرنا وذلك بالعمل على إستطالة البوليمر، ويعود إلى حالته الأصلية بعد زوال إجهاد الشد، كما في الحالة الأولى من الشكل(7–4) وقد يكون مرناً أو لدناً تبعاً لقوة الشد ودرجة الحرارة إلى أن تستقيم الذات على خط واحد، وقد يكون الانفعال لدناً ونهائياً وذلك بسبب إنزلاق ذرات الجزيئات على بعضها البعض وتكسر بعض الروابط الثانوية.

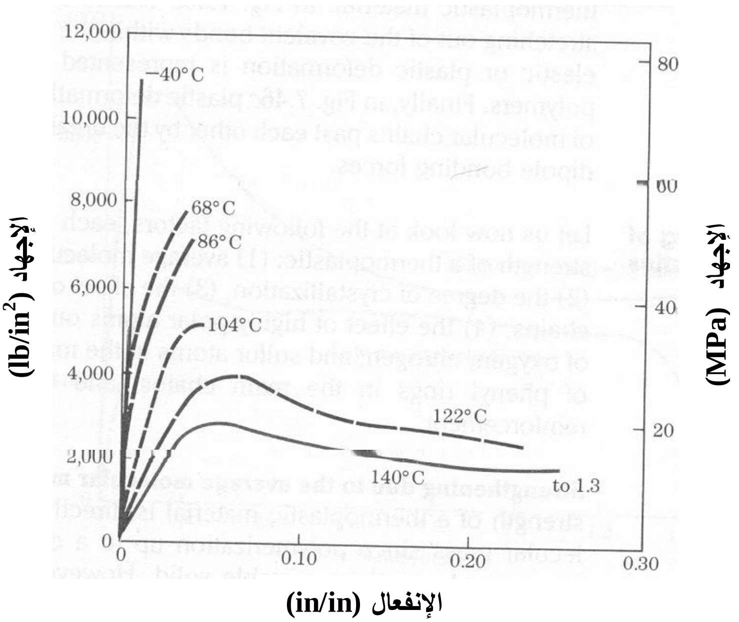


شكل (7–4) تأثير إجهاد الشد على البوليميرات الحرارية.

ومن ناحية أخرى فإن درجة الحرارة لها تأثير كبير على الإجهاد والإنفعال الناتج عنه للبليميرات الحرارية، ففي حالة تعرض البوليمر إلى درجة حرارة أقل من

درجة إنتقال البريق، فإن الإنفعال يكون مرن قليل الإستطالة وينتج عنه بعد ذلك كسر قصفي هش.

أما في حالة تعرض البوليمر إلى حرارة عالية فإن الإنفعال يكون لدن ذو مطيلية كبيرة ومنطقة مرونة صغيرة. والشكل(7-5) يبين العلاقة بين الإجهاد والإنفعال لبوليمر بولي ميثيل ميتا أكريليت الذي يمثل مجموعة اللدائن الحرارية، ويلاحظ أن درجة إنتقال البريق لهذا البوليمر تتواجد في مدى 84 إلى 104 دم.



شكل(7-5) تأثير الإجهاد ودرجة الحرارة على بولي ميتيل ميتا أكريليت.

الجدول (7-1) درجات حرارة إنتقال البريق، لبعض البوليميرات.

Polymer	Tg (^{o}C)
Polyethylene (بولي إثيلين)	-110
Polypropylene (بولي بروبيلين)	
Polyvinyl acetate (بولي فينيل أسيتيت)	-18
Polyvinyl chloride (بولي فينيل كلوريد)	29
Polystyrene (بولي ستيرين)	82
Polymethyl methacrylate (بولي ميثيل ميثاكريليت)	75-100
	72

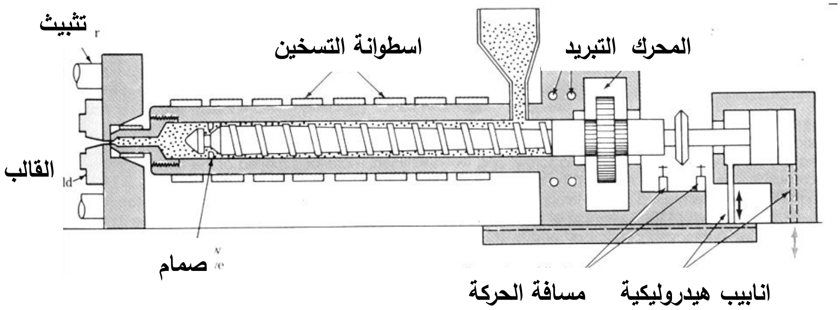
5.7 تصنيع المواد البلاستيكية:

تمتاز طرق تصنيع وإنتاج المواد البلاستيكية بسهولة إستخدامها وإنتاجيتها العالية مع إمكانية تصنيع أشكال معقدة في خطوة واحدة، بالإضافة إلى الحصول على سطح ذو تشطيب نهائي. كما يمكن تصنيع هياكل كبيرة في خطوة واحدة مثل هياكل القوارب والسيارات وبعض أجزاء الطائرات أو طويلة مثل الأنابيب أو دقيقة مثل الألياف. ويوجد هناك العديد من طرق تصنيع المواد البلاستيكية أهمها ما يأتي:

1.5.7 **الحقن (Injection molding):**

تعتبر طريقة الحقن ذات أهمية كبيرة بسبب إنتاجيتها العالية، وسهولة إستخدامها وإحتياجها إلى عدد قليل من العمالة، بالإضافة إلى قدرتها على تصنيع منتجات عالية الجودة، وفي هذه الطريقة يتم صهر البوليمر حراريا أو باستعمال مواد محفزة، بحيث تكون جاهزة للحقن داخل قوالب لها شكل المنتج المطلوب كما بالشكل(7-3)، ويكون الحقن عادة على دفعات بحيث يبرد القالب المجهز بمبادل

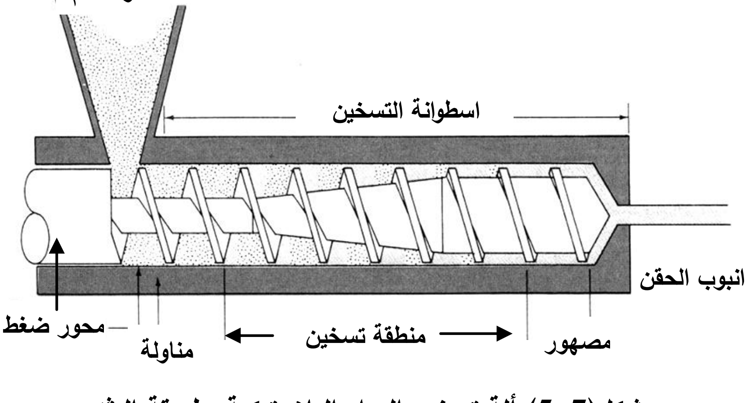
حراري الذي يعمل على تجمد المنتج، وبعد ذلك يتم فك القالب وإخراج الشغلة ويعاد ربطه مرة أخرى ليستقبل شحنة جديدة من مصهور البوليمر، وهكذا دواليك.



شكل(7–4) ألة حقن المواد البلاستيكية.

2.5.7 **طريقة البثق (Extrusion):**

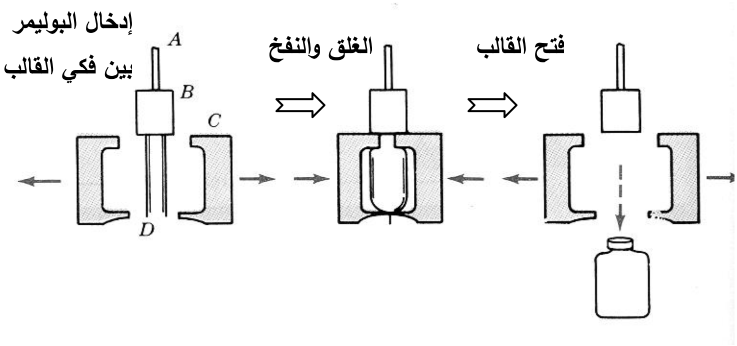
والطريقة الأخرى المستعملة على نطاق واسع هي البثق، وتستخدم هذه الطريقة لصناعة الأنابيب والأقطاب والصفائح بأحجام وأشكال متنوعة، وذلك باستعمال ضواغط كبيرة ويكون الانتاج عادة مستمرا بحيث يتم تبريد المنتوج خارج الآلة بإستعمال الهواء أو الماء كما بالشكل(7-4).



شكل(7–5) ألة تصنيع المواد البلاستيكية بطريقة البثق.

3.5.7 **طريقة النفخ:**

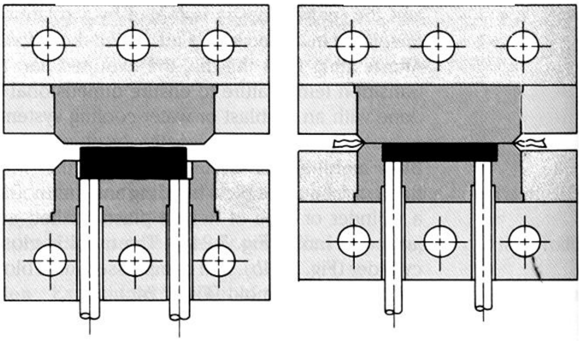
لقد درجت الصناعة على تصنيع الأوعية المجوفة مثل القارورات والبرطمانات والبراميل البلاستيكية بطريقة النفخ (Blow molding) بحيث يتم تسخين المادة الخام وتحقن كأنبوب دائري سميك شبه صلب بين طرفي قالب مفتوح، يلي ذلك غلق القالب على طرفي أنبوب البوليمر ونفخ الأنبوب داخليا باستعمال مضخات الهواء بحيث يمتد البوليمر ويعمل على تكوين طبقة رقيقة تغطي السطح الداخلي للقالب، وبعد أن يبرد (باستعمال الماء أو الهواء) يتم فك طرفي القالب وإخراج الوعاء المجوف كما بالشكل(7−6).



شكل(7−6) خطوات التصنيع بطريقة النفخ.

4.5.7 **طريقة الضغط أو الكبس (Compression molding):**

وتستعمل الطرق السابقة كثيراً في تشكيل اللدائن الحرارية (Thermoplastics)، في حين أن اللدائن المتصلبة بالحرارة يتم تشكيلها بطريقة قوالب الضغط وفي هذه الحالة توضع المواد الخام في قالب ثم تعرض للحرارة والضغط بحيث ينصهر البوليمر ويأخذ شكل القالب الذي وضع فيه كما بالشكل(7-6).



شكل(7-6) خطوات التصنيع بطريقة قوالب الضغط.

6.7 أنواع اللدائن الحرارية:

تختلف الخواص الفيزيائية والميكانيكية كثيراً بين هذه المجموعة، ويمكن تقسيمها إلى مجموعتين رئيسيتين وهما؛ الأولى تلك التي تتصف بدرجة حرارة إستعمال منخفضة وقوة شد ضعيفة وهذه يمكن تسميتها بالدائن الحرارية التقليدية أو لدائن الأغراض العامة، ومن هذه اللدائن بولي إثيلين و بولي بروبيلين و بولي فينايل كلوريد والاكريليك، والجدول (7-2) يوضح أهم الخواص الفيزيائية والميكانيكية لها.

وتوجد مجموعة أخرى تتحمل درجات الحرارة وذات وقوة شد أكبر من المجموعة السابقة وهذه تسمى باللدائن الحرارية الهندسية، وتتصف بخواص ميكانيكية جيدة إلا أنها ذات تكلفة عالية والجدول (7-2) يوضح بعض اللدائن الحرارية الهندسية وخواصها.

وتتصف المجموعة الأخيرة بموصفات جيدة تجعلها بديلا عن الكثير من المعادن والسبائك في الإستعمالات الهندسية، مثل قطع الغيار ومعدات السلامة وغيرها من التطبيقات.

جدول (7-2) الخواص الفيزيائية والميكانيكية لبعض البوليميرات الحرارية.

البوليمر	الكثافة (جم/سم3)	قوة الشد (MP)	الحرارة القصوى للاستعمال د م
بولي ايثيلين: عالي الكثافة	0.93-0.92	16-6	100-82
: منخفض الكثافة	0.96-0.95	21-2	120-80
بولي فينيل كلوريد	1.58-1.49	60-49	110
بولي بوبيلين	0.91-0.90	36-34	150-107
ستيرين _ أكريلونيتريل	1.08	70-67	104-60
أي بي أس	1.07-1.05	40	93-71
أكريليك	1.19-1.11	75	110-54
سوليولوز أسيتيت	1.3-1.2	54-20	104-60
بولي تترافلوروإثيلين	2.3-2.1	26-6.7	288

1.6.7 الدائن الحرارية التقليدية:

1- بولي إثيلين (Polyethylene):

يتم تصنيع نوعين من بولي إثيلين إحداهما عالي الكثافة ذو سلاسل طويلة والآخر منخفض الكثافة ذو سلاسل متفرعة كما بالمعادلة(7-6) وقد تصل عدد الوحدات في السلسلة مابين 3500 و 35000 وحدة.

$$n[CH_2 = CH_2] \rightarrow \quad -[-CH_2 - CH_2 -]_n - \qquad (7-7)$$

ويستعمل الشق الطليق كعامل مساعد للتفاعل ومن هذه المركبات فوق أكسيد الهيدروجين والأكاسيد الأخرى المحتوية على الأكسجين كما سبق دراسته في تفاعلات البلمرة وهي كما يأتي:

$$H_2O_2 \rightarrow 2H-O^\bullet$$
$$R-O^\bullet, C-COO^\bullet$$

ويعتبر بولي إيثيلين من اللدائن الأكثر إستعمالاً حيث يمثل أكثر من 32 % من مجموع المواد البلاستيكية المنتجة في الدول المتقدمة مثل الولايات المتحدة الأمريكية، ويرجع ذلك إلى خواصه المناسبة للعديد من التطبيقات اليومية مثل الصلابة الجيدة عند درجة الحرارة العادية والمنخفضة حتى 73 تحت الصفر المئوي، وكذلك العزل الحراري الجيد والقابلية لتصنيع أشكال مختلفة وألوان متعددة وصفائح متباينة السمك.

ويستخدم بولي إيثيلين في العديد من الأغراض، منها صناعة الأنابيب والقوارير وعبوات تغليف المواد الغذائية والدوائية وكذلك البيوت البلاستيكية المستعملة في الزراعة ، والعوازل الكهربية والحرارية وما إلى ذلك من المقتنيات المنزلية.

2- بولي فينيل كلوريد(Poly vinyl chloride):

يعتبر بولي فينيل كلوريد **(PVC)** المنتج الثاني الأكثر إستعمالاً بعد بولي إيثيلين وذلك لسببين رئيسيين إحداهما مقاومة هذا البوليمر العالية للمواد الكيميائية وخاصة الحامضية والقلوية، والسبب الآخر إمكانية إضافة العديد من المركبات الكيميائية عند التصنيع للحصول على لدائن ذات خواص كيميائية وفيزيائية متنوعة. ويتكون بولي فينيل كلوريد من الايثيلين المتفاعل مع الكلور، ويحضر صناعيا من تفاعل غاز الأسيتيلين مع حمض الهيدروكلوريك في وجود مادة محفزة.

$$-[-CH_2-CHCl-]_n$$

بولي فينيل كلوريد (PVC)

ومن الناحية العملية فإن عدد قليل من التطبيقات مثل صناعة أنابيب رخيصة الثمن يستخدم لها بولي فينيل كلوريد المتجانس (أي بلا إضافات) وذلك أن هذا البوليمر صعب التشكيل عند التصنيع وينتج مشغولات هشة قليلة الصلابة رغم مقاومتها العالية للمواد الكيميائية. ومن المركبات المضافة لتحسين خواص بولي فينيل كلوريد ما يأتي:

أ- مواد ملدنة (Plasticizers):

إن إضافة المواد الملدنة إلى بولي فينيل كلوريد تكسبه سيولة و ليونة عند التشكيل والحقن، ولدونة بعد التصنيع لبعض الأنواع منها، وهذه المواد تحتوي على مركبات ذات وزن جزيئي كبير مثل فتليت إستر (Phthalate esters) أو باستعمال بوليميرات ذات أوزان جزيئية عالية.

وتستعمل النوعيات المرنة واللدنة من بولي فينيل كلوريد في الكثير من الأغراض مثل صناعة ألأرضيات البلاستيكية والأنابيب المرنة وورق تكسية الحوائط، كما أن الأنواع التي تحتوي على كمية كبيرة من المواد الملدنة تستعمل كطلاء مقاوم للظروف الجوية والمواد الكيميائية.

ب- مواد تثبيت الحرارة (Heat stabilizers):

وهي مواد تضاف لأجل إستقرار درجة حرارة البوليمر عند التصنيع وتلافي أضرار إرتفاع درجات الحرارة، كما تزيد من عمر المنتوج النهائي. ومعظم هذه المواد تتركب من شقين عضوي ومعدني (Organo-metallic) بحيث يحتوي الشق المعدني على أحد المعادن مثل الرصاص أو القصدير أو الكالسيوم أو الخارصين، والجزء الآخر يحتوي على مواد عضوية.

ج- مواد تشحيم (Lubricants):

وهي مواد تمنع التصاق البوليمر بالقالب بعد التصلب وتساعد على نزع المنتوج بسهولة، وتشمل مواد التشحيم المستعملة في هذا المجال الشمع والصابون المعدني (Metallic soaps).

د- مواد مالئة (Fillers):

وهي مواد تعطي قوام للبوليمر وتخفض من تكلفة المواد الخام المستعملة، ومن هذه المواد كربونات الكالسيوم.

هـ- مواد الصباغة (Pigments):

يمكن إضافة مركبات عضوية وغير عضوية مثل أكاسيد المعادن لتضفي على البوليمر ألوان مختلفة وبدرجات متفاوتة.

ويستخدم بولي فينيل كلوريد في العديد من الأغراض نتيجة لتصنيعه بخواص فيزيائية وميكانيكية متنوعة، ومن هذه الاستعمالات صناعة المنسوجات والورق وصناعة الأرضيات والأثاث والأحذية والحقائب، ويستخدم كذلك كعازل للأسلاك والكابلات الكهربائية وفي الكثير من الأجزاء الداخلية للسيارات والمركبات والسفن وغيرها.

3- بولي بروبيلين (Polypropylene):

يمتاز بولي بروبيلين عن سابقيه بإرتفاع درجة الإنصهار، حيث تصل إلى 177 دم ويمكن إستعماله حتى 120 دم، كما أنه مقاوما جيداً للرطوبة والمواد الكيميائية وخفيف الوزن (0.9 جم/سم3)، وهذه الكثافة تمكن منتوجات البوليمر من الطفو على الماء. ويتصف بولي بروبيلين كذلك بالصلابة الجيدة والسطح الامع الذي لا لون له

والأهم من ذلك التكلفة المنخفضة للمواد الخام. وتتكون وحدة بولي بروبيلين من ثلاثة ذرات كربون مشبعة بالهيدروجين والتي تنتج من تفاعل الايثيلين مع الميثان.

$$-[-CH_2-CH(CH_3)-]_n-$$

بولي بروبيلين

ولقد ثم توظيف هذه المزايا في صناعة العديد من المنتوجات مثل عبوات التغليف والقوارير وصناعة هياكل المراكم الرصاصية والغلاف الأرضي للسجاد والحبال البلاستيكية وتجهيزات التزلج على الماء وغيرها.

4- بولي ستيرين (Polystyrene) :

يمثل بولي ستيرين 20 % من مجموع الإستهلاك الدولي من اللدائن، ويتم تصنيعه من وحدة بولي ستيرين التي تتكون من جزئ الايثيلين ثم إستبدال أحد ذرات الهيدروجين بحلقة بنزين، وحيث أن جزئ البنزين كبير، فإنه يعيق حركة جزيئات البوليمر، مما يزيد من صلادته ويجعل بولي ستيرين من اللدائن الهشة القابلة للكسر.

ومن خواص بولي ستيرين أنه غير متبلر، لا لون له، قليل الصلابة، مع عزل كهربائي جيد، وتكلفة منخفضة للمواد الخام، ويمتاز بولي ستيرين كذلك بسهولة تشكيله إلى صفائح وأشكال هندسية مختلفة، كما يدخل في صناعة الإسفنج الصناعي.

بالمقابل يعتبر هذا البوليمر غير مقاوم للرطوبة ويتأثر بمعظم المذيبات العضوية والزيوت وكذلك الأشعة الفوق بنفسجية، وله درجة إنصهار منخفضة تقارب 115 دم.

```
   H    H
   I    I
 – C =  C  –
   I    I
   H  C6H6
```

بولي ستيرين

ويستخدم بولي ستيرين للأغراض الإقتصادية مثل الادوات والأواني المستعملة لمرة واحدة وعلب تغليف الأغذية والألعاب وبعض العوازل الحرارية، ومن الملاحظ أن هذا البوليمر لا يرقى إلى الإستخدامات الهندسية ولكنه يعتبر مصدرا مهما لتصنيع البوليميرات القوية الأخرى.

5- أكريلونيتريل بيوتادايين ستيرين (Acrylonitrile Butadiene Styrene):

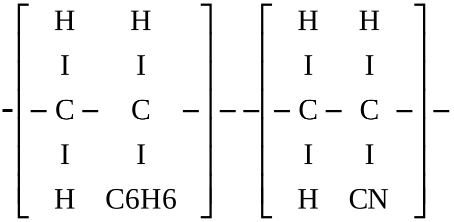
إن معظم عيوب بولي ستيرين السابقة يمكن التخلص منها بإضافة مجموعات جديدة ترتبط مع بولي ستيرين في سلاسل طويلة أو تلقيمها في تفريعات مختلفة، ومن أهم المركبات المضافة أكريلونيتريل و بيوتادايين منفردين أو الأفضل، إضافتهما معا.

```
 ┌  H     H   ┐   ┌  H   H   H   H  ┐
 │  I     I   │   │  I   I   I   I  │
–│ –C –   C  –│– –│ –C – C = C – C– │–
 │  I     I   │   │  I           I  │
 └  H   C6H6  ┘   └  H           H  ┘
```

بولي ستيرين 60 %   بولي بيوتادايين 40 %

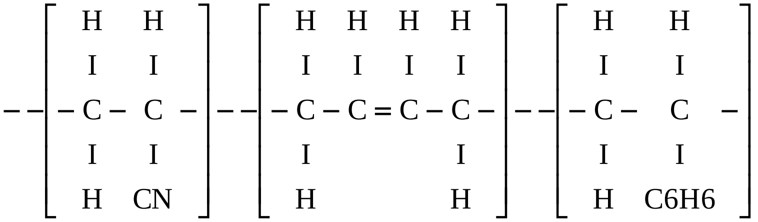
ويستعمل ستيرين بيوتادايين كثيراً في صناعة الطلاء وكمادة خام للبوليميرات المطاطية.

وعند إضافة ستيرين إلى أكريلونيتريل يمكن الحصول على بوليمر يمتاز بمقاومة جيدة للحرارة والظروف الجوية مع تحسن كبير في الصلابة، ويستعمل هذا البوليمر لصناعة المنسوجات والأغطية العازلة للحرارة.



30 % بولي أكريلونيتريل   70% بولي ستيرين

والأهم من ذلك أن إضافة البوليميرات الثلاثة إلى بعضها البعض، وذلك بتلقيم بيوتادايين إلى سلسلة أكريلونيتريل والستيرين بحيث يتم تصنيع أكريلونيتريل بيوتادايين ستيرين (ABS)، وهذا البوليمر يعتبر مهما من الناحية الصناعية وذلك لخواصه الجيدة مثل الصلابة العالية والتشطيب النهائي الجيد مع سهولة التصنيع. ويستخدم هذا البوليمر في صناعة العديد من الأغراض مثل هياكل الهواتف والحاسبات وأجهزة الاستقبال المختلفة، وكذلك في صناعة الأنابيب وملحقاتها وقطع الغيار وغيرها.



S : بولي ستيرين   B : بولي بيوتادايين   A : بولي أكريلونيتريل

6- بولي ميثيل ميثاكريليت (Poly methyl methacrylate PMMA):

تتكون وحدة هذا البوليمر من جزئ ايثيلين ثم استبدال احدى ذرات الهيدروجين بمجموعة الميثيل كما استبدلت الذرة الأخرى بمجموعة الحمض العضوي، ويتم تصنيعه بتفاعل حمض ميثيل أكريليك [$CH_2{=}C(CH_3)COOH_3$] مع كحول.

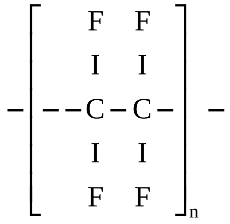
$$-\left[\begin{array}{ccc} & H & H & \\ & I & I & \\ --C- & & C & - \\ & I & I & \\ & H & COOCH_3 & \end{array}\right]_n-$$

بولي ميثيل ميثاكريليت

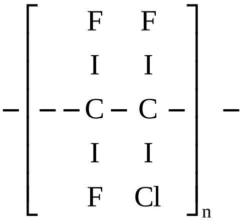
ويمتاز البوليمر بشفافية عالية وصلادة للسطح، ومقاومة جيدة للظروف الجوية والمواد الكيميائية، وله صلابة أكبر من الزجاج ولذا يستعمل بديلا له في العديد من التطبيقات مثل عدسات النظارات الواقية وكستارة شفافة عند تشغيل الالات وفي صناعة الزوارق وكذلك لصناعة الاحواض ومقابض الأثاث وغيرها من الأغراض اليومية، وله عدة أسماء تجارية مثل (Purbexglass) و(Plexiglass).

7- لدائن الفلور(Flore polymers):

تتكون لدائن الفلور من وحدة إثيلين تم إستبدال بعض أو كل ذرات الهيدروجين بذرات الفلور مع إضافة عناصر أخرى. ومن هذه المجموعة يجدر بنا ذكر مركبين مهمين وهما بولي تترافلوروإثيلين (PTFE) المعروف تجاريا بالتفلون (Teflon) وبولي كلورو ترافلورواثيلين (PCTFE).



بولي تترافلوروإثيلين (PTFE)



بولي كلورو ترافلوروواثيلين (PCTFE)

ويعتبر البوليمر الأول (PTFE) ذو مقاومة للمواد الكيميائية مع عزل للحرارة والكهرباء بالاضافة إلى الصلابة العالية حتى 160 دم إلا أنه ضعيف المقاومة للاحتكاك وله قوة شد منخفضة ولذا لا يستعمل في صناعة الهياكل.

ويلاحظ أن بولي تترافلوروواثيلين (PTFE) لا ينصهر ويصعب تشكيله بالطرق المتداولة مثل الحقن، ويتم تصنيعه عادة بطريقة تكنولوجيا المساحيق وذلك بسكب مسحوق البوليمر في قالب ورفع حرارته إلى درجة الإنصهار. أما البوليمر الثاني فيصنع عادة بطريقة الحقن، ويظهر مقاومة أقل للمواد الكيميائية كما أن أقصى درجة حرارة لإستعماله لا تتجاوز 200 دم.

وتستخدم لدائن الفلور في صناعة الأنابيب وهياكل المضخات وعوازل للكوابل وأطواق منع التسرب وغيرها، والجدير بالذكر أن هذه المجموعة لها تكلفة مرتفعة مقارنة بغيرها.

2.6.7 اللدائن الحرارية الهندسية (Engineering Thermoplastics):

إن معظم اللدائن المستعملة في التطبيقات الهندسية المختلفة لها خواص ميكانيكية وفيزيائية جيدة ومناسبة لظروف التشغيل الهندسية، والجدول (7-3) يوضح بعض اللدائن الحرارية وخواصها.

الجدول (7-3) يوضح بعض اللدائن الحرارية وخواصها.

البوليمر	الكثافة (جم/سم^3)	قوة الشد (MP)	الحرارة القصوى للإستعمال (دم)
نايلون 6-6	1.15-1.13	72-62	150-82
بولي كربونيت	1.2	62	120
بولي فينايلين أوكسيد	1.06	66-48	105-80
بولي سلفون	1.24	70	150
بولي فينايلين سولفيد	1.34	68	260

1. النايلون (بولي أميد) :

تتركب لدائن النايلون من سلاسل متبلرة تحتوي على تكرار لوحدة أميد (-CO-NH-) ويصنع بولي أميد من تفاعل مجموعة الأمين مع حامض عضوي، ويمتاز النايلون بصلابة جيدة وتحمل درجات الحرارة حيث أن درجة إنصهاره عالية (250–266 دم)، وله مقاومة جيدة للإحتكاك وعدم التأثر بالمواد الكيميائية، ويتم تصنيع النايلون بالطرق التقليدية مثل الحقن والبثق.

نايلون 6 -6 (PI)

$$\begin{array}{ccccccccc} & H & & & O & & & O & \\ & I & & & II & & & II & \\ - & N & -(CH_2)_6 & - & C & -(CH_2)_4 & - & C & - \end{array}$$

ومن عيوب النايلون إمتصاصه للماء عند غمره لمدة طويلة مما يؤدي إلى تغير في أبعاد المواد المصنعة منه.

ويستعمل النايلون على نطاق واسع في شتى مجالات الصناعة مثل صناعة التروس وكراسي التحميل والاجزاء التي تتحمل الإحتكاك والحرارة. وكذلك القطع التي تحتاج إلى زيوت أو شحوم أو مواد مذيبة، وفي العربات والسيارات يستخدم النايلون في صناعة مراوح تبريد المحرك وخزانات سائل الكوابح، كما يستعمل في صناعة عوازل الموصلات الكهربية.

2. بولي كربونات (PolyCarbonate):

يتم تصنيع بولي كربونات من وحدة جزئ يوجد بها حلقتين بنزين ومجموعة الميثيل في ذرة كربون واحدة مع ترابط إحدى الحلقات بمجموعة الكربونات. ويوجد لهذا المركب العديد من الأسماء التجارية مثل (Lexon, Merlon).

$$-\left[\begin{array}{ccccccc} & & O & & CH_3 & & \\ & & II & & I & & \\ -O- & & C & -(C_6H_6)- & C & -(C_6H_6)- & \\ & & & & I & & \\ & & & & CH_3 & & \end{array}\right]_n -$$

بولي كربونيت
(PC)

وتتصف هذه اللدائن بالخواص الآتية:

أ- مقاومة جيدة للصدمات تصل ما بين 640 إلى 854 جول /متر (بمقياس إيزود).

ب- قوة شد تصل إلى 62 ميجاباسكال.

ت- تحمل جيد لدرجات الحرارة، بما لها من نقطة إنصهار عالية تقارب 270 دم.

ث-عزل جيد للكهرباء.

ج- مقاومة عالية نسبيا للتزحف.

ح- تقاوم العديد من المواد الكيميائية مثل الأحماض والقلويات ولا تتحمل المذيبات العضوية.

خ- جساءة وثبات عالي للأبعاد مما يجعلها مناسبة للقطع الهندسية الدقيقة.

وتستعمل لدائن بولي كربونات في العديد من التطبيقات الهندسية مثل التروس وعمود الكامات لبعض الالات وأجزاء الطائرات و هياكل العدد الكهربية اليدوية وفي صناعة هياكل مرقاب الحواسيب وكذلك مراوح القوارب والعدسات الواقية وقبعات حماية الرأس وغيرها.

3. أسيتال (Acetals):

يتم تصنيع لدائن الأسيتال من جزئ بولي أكسي ميثيلين الذي يتكرر لتكوين سلاسل، وتعتبر لدائن الاسيتال من اللدائن الحرارية التي تستخدم في الأغراض الهندسية ذات الأداء والكفاءة العالية، فهذه المجموعة لها قوة شد تقارب 70 ميجاباسكال ومقاومة جيدة للكلال وإمتصاص قليل للمياه والرطوبة.

بولي أكسي ميثيلين – $\mathbf{(POM)} - \left[- - \overset{\displaystyle H}{\underset{\displaystyle H}{\overset{|}{\underset{|}{C}}}} - O - \right]_n$

ومن المميزات الأخرى لهذه البوليميرات، مقاومة الاحتكاك ومقاومة جيدة للمذيبات العضوية، إلا أنها كثيرة الإنكماش عند الحقن، ويتغير شكل وأبعاد مصنوعاتها عند تعرضها إلى حرارة تتجاوز 90 دم، كما أنها قابلة للإشتعال، وهذا يحد من إستعمالها عند درجات الحرارة العالية أو في مجال العوازل الكهربية.

ويستعمل الاسيتال في صناعة ريشات المضخات والتروس وعمود الكامات والمصنوعات التي لا تتعرض إلى حرارة عالية وكذلك في صناعة مصفيات الوقود للسيارات والعربات وغيرها.

4- بولي سولفون (PolySulfones):

يعتبر بولي سولفون من اللدائن الحرارية العالية الأداء، حيث يجمع ما بين الجساءة والصلابة العالية ومقاومة الشد التي تبلغ 70 ميجاباسكال وتحمل الحرارة حتى 174 دم، علما بأن درجة إنصهار بولي سولفون تناهز 315 دم، ويتصف كذلك بمقاومة جيدة للمواد الكيميائية.

ومن ناحية أخري فان جزئ بولي سولفون معقد التركيب حيث يحتوي على مركبين مرتبطان بذرة أكسجين، الأول يحتوي على حلقتي بنزين ومجموعتي ميثيل مترابطة مع ذرة كربون، والمركب الآخر يحتوي على حلقتي بنزين ومجموعة السلفون وهذا التعقيد في التركيب الجزيئي يحول دون تبلره، ولذلك فإن بولي سولفون يعتبر بوليمر غير متبلر ذو شفافية عالية.

$$-\left[\begin{array}{ccc} & CH_3 & & O & \\ & II & & II & \\ -(C_6H_6)- & C & -(C_6H_6)-O-(C_6H_6)- & S & -(C_6H_6)-O- \\ & II & & II & \\ & CH_3 & & O & \end{array}\right]_n -$$

بولي سولفون (PSU)

منذ تصنيع وتسويق بولي سولفون على نطاق تجاري في سنة 1970 م حاز هذا البوليمر على إهتمام كبير وتطبيقات متعددة، حيث يستعمل في صناعة لوحات الدوائر الاليكترونية والمكثفات الشريطية وقلب الملفات الكهربية وفي صناعة الأنابيب والمضخات المستخدمة للمواد الكيميائية وكذلك أواني التعقيم بالمستشفيات وغيرها.

5- **بولي فينيلين سولفيد (Poly Phenylene Sulfide)**:

ثم تصنيع بولي فينيلين سولفيد لأول مرة في سنة 1973 وينتج حاليا من تكرار جزئ يحتوي على حلقة البنزين مرتبطة معها ذرة كبريت.

$$-[-(C_6H_6)-S-]_n -$$

بولي فينيلين سولفيد (PPS)

ويعتبر هذا البوليمر المتبلر مقاوما جيدا للمواد الكيميائية حتى درجات حرارة عالية تزيد عن 200 دم مع خواص ميكانيكية جيدة، وله درجة إنصهار تقارب 288 دم. ويلاحظ أن وجود ذرة الكبريت تجعل البوليمر صلبا ومقاوما جيدا للمواد الكيميائية وخاصة المذيبات العضوية والزيوت، كما أن بساطة تركيب البوليمر ساعده على أن

يكون متبلرا، إلا أن ما يؤخذ على هذا البوليمر أنه يتأثر بالأشعة الفوق بنفسجية الناتجة من أشعة الشمس مما يسبب في تلفه بمرور الزمن.

ويدعم بولي فينيلين سولفيد بإضافة مواد مالئة مثل الألياف أو المساحيق الزجاجية أو الكربونية أو بإضافة بولي تترافلوروإثيلين. والجدير بالذكر أن الأنواع المحتوية على الألياف الكربونية يمكن إستخدام منتوجاتها حتى 260 دم.

ويستعمل بولي فينيلين سولفيد في صناعة المضخات الغاطسة والصمامات وقطع غيار السيارات القريبة من المحرك مثل الغلاف الخارجي لملف الكهرباء وغيرها من العوازل الحرارية والكهربية . كما يستخدم هذا المركب في طلاء أنابيب النفط وملحقاته لعزلها عن المحيط وتلافي تآكلها وخاصة في المناطق الصناعية.

7.7 اللدائن المتصلبة بالحرارة (Thermosetting Plastics):

اللدائن المتصلبة بالحرارة عبارة عن سلاسل هيدروكربونية ذات روابط تساهمية ترتبط مع بعضها بروابط متقاطعة تكونت بسبب الحرارة والضغط أو بإضافة مواد محفزة، وينتج عن ذلك شبكة متقاطعة من تكرار وحدات المركب الهيدروكربوني. ويتم تصنيع هذه اللدائن عادة بطريقة قوالب الضغط (Pressure Molding) إلا أنه أخيراً تم تطوير بعض طرق الحقن لتستعمل في هذا المجال.

إن الفرق الأساسي بين اللدائن الحرارية واللدائن المتصلبة بالحرارة أن الأولى يمكن إعادة تدويرها، أي إعادة صهرها وتصنيعها عدة مرات، في حين أن اللدائن المتصلبة بالحرارة غير قابلة للتدوير أي لا يعاد تشكيلها بعد التصلب، وهذا يحد من الاستفادة من بقايا منتوجاتها. ويوجد العديد من اللدائن المتصلبة بالحرارة المستعملة في نواحي الصناعات الهندسية نذكر منها لدائن الفينول ولدائن الإيبوكسي ولدائن

بولي إستر والميلامين، ولكل من هذه اللدائن خواصه ومجالات إستعماله، إلا أن لهذه المجموعة مميزات عامة يمكن إيجازها فيما يأتي:

1- ثبات حراري عالي حتى 150 دم والبعض منها حتى 280 دم.

2- عزل حراري وكهربائي جيد.

3- جساءة عالية (High Rigidity).

4- مقاومة جيدة للتزحف.

ومن مساوي اللدائن المتصلبة بالحرارة أنها لها مقاومة شد ضعيفة، ويمكن تحسين ذلك بإضافة الألياف الزجاجية أو السليولوزية أو مساحيق الزجاج أو الخشب أو الميكاء. وتتدرج قوة الشد لهذه المجموعة ما بين 28 إلى 103 ميجاباسكال، وبإضافة الألياف الزجاجية يمكن الحصول على قوة شد تزيد عن 207 ميجاباسكال.

1- لدائن الفينول (Phenollics):

تعتبر لدائن الفينول من أوائل المواد البلاستيكية التي أستخدمت في الصناعة، حيث ثم تصنيعه في سنة 1909 م، وذلك بتفاعل الفينول مع الفورمالدهيد في وجود عامل محفز (هيكسا ميثيلين تترامين) عند درجة حرارة من 120 إلى 170 دم لتكوين بوليمر فينول فورمالدهايد، وتحدث هذه التفاعلات على عدة مراحل. كما تضاف مواد مالئة عند التصنيع لتحسين الخواص الميكانيكية وتقليل التشققات الناتجة عن الإنكماش عند تبريد البوليمر.

$$-\left[\begin{array}{ccccc} & H & OH & H & \\ & I & I & I & \\ - & C - & (C_6H_6) & - C & - \\ & I & I & I & \\ & C & CH_3 & H & \end{array}\right]_n - \quad \textbf{(PF)}$$ **فينول فورمالدهايد**

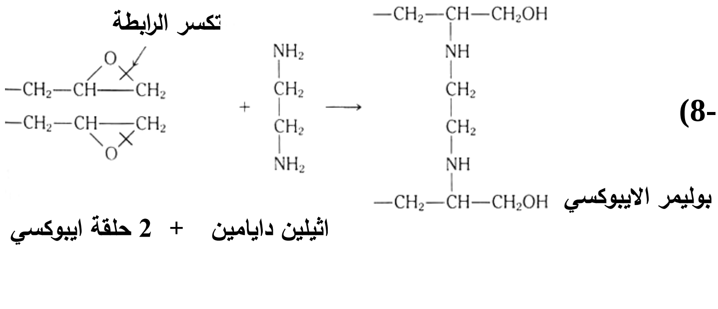
وينتج عن البلمرة شبكة من سلاسل البوليميرات المتقاطعة ذات صلادة عالية ومقاومة للمواد الكيميائية مع عزل كهربي وحراري جيد.

قد تم توظيف العزل الكهربي للدائن الفينول في العديد من التطبيقات الهندسية والأغراض المنزلية، منها صناعة مفاتيح ومآخذ الكهرباء في المنازل ومقابض الأواني والأثاث وقطع غيار الكوابح الهيدروليكية ومرحلات الهواتف (Telephone Relay) وغيرها. كما يستعمل بوليمر الفينول في صورته السائلة كغراء في صناعة الخشب الحبيبي وكمادة رابطة لرمال السباكة.

2- لدائن الايبوكسي (Epoxy Resins):

تحتوي بوليميرات الايبوكسي على مجموعة رئيسية وهي مجموعة الإيبوكسيد (Epoxide) بالإضافة إلى مجموعات أخرى مساعدة مثل الامين أو الألدهايد، وعند البلمرة، تتكسر رابطة الأكسجين في مجموعة الايبوكسيد وتدخل في تفاعل مع الامين لتكوين سلاسل متقاطعة. وكثيرًا ما تستعمل أمينات معقدة تحتوي على حلقات بنزين بدلا عن إيثيلين دايامين المستخدم كمادة تصليب للإيبوكسي.

ويحتاج بوليمر الايبوكسي إلى حرارة حتى يتم التفاعل بصورة جيدة ويستخدم لذلك أفران حرارتها مابين 80 إلى 120 دم.



(8-7)

ويمتاز الايبوكسي بمقاومة جيدة للمواد الكيميائية والرطوبة والتصاقه الجيد بمعظم المواد مع صلادة عالية وعزل حراري جيد.

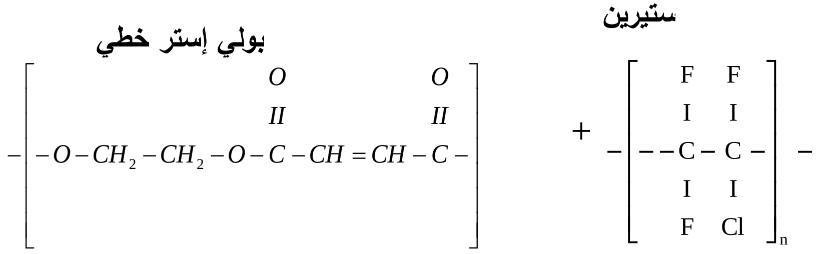
نتيجة لمقاومة الإيبوكسي للظروف الجوية والمواد الكيميائية المختلفة فان معظم بوليميرات الإيبوكسي تستخدم في مجال الطلاء (كعبوتين)، وذلك لحماية ألأنابيب والخزانات والالات من التآكل، والقسم الآخر منه يدخل كمادة رابطة في صناعة المواد المركبة، التي تنتج من ألياف الزجاجية أو الكربونية والتي لها إستخدامات واسعة في الصناعة.

3- لدائن بولي إستر (Polyesters):

يمكن الحصول على بولي إستر خطي غير مشبع من تفاعل مركب كحولي له مجموعتين من الهيدروكسيل(OH^-) مع حمض عضوي يحتوي على مجموعتين من الحامض (COOH-) وبذلك يمكن الحصول على إستر يحتوي على رابطة ثنائية (غير مشبع) بين ذرتي الكربون كما في المعادلة (7–8) ، وهذه الرابطة يمكن كسرها وإدخال بوليميرات جديدة في مكانها، ومن هذه المركبات ستيرين الذي يتفاعل مع الإستر في وجود مواد محفزة لتكوين شبكة متقاطعة من بولي إستر كما في المعادلة (7–9).

$$\left[HO-\underset{\underset{H}{|}}{\overset{\overset{H}{|}}{C}}-\underset{\underset{H}{|}}{\overset{\overset{H}{|}}{C}}-OH+HO-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-CH=CH=\overset{\overset{O}{\|}}{C}OH \right] \rightarrow -\left[-O-CH_2-CH_2-O-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-CH=CH-\overset{\overset{O}{\|}}{C}- \right]-+H_2O$$

(7–9) ماء + بولي إستر خطي حمض الماليك إثيلين جليكول



⟵ (شبكة متقاطعة من بولي إستر) (10-7)

ويعتبر بولي إستر ذو مقاومة شد ضعيفة، ويتم تحسين مقاومته باضافة الألياف الزجاجية أو الألياف الأخرى بنسبة قد تصل إلى 80 % من وزنه، والتي يمكن لها زيادة مقاومة الشد إلى 344 ميجاباسكال. ويمتاز هذا البوليمر بمقاومته الجيدة للمواد الكيميائية والظروف الجوية.

ويمكن إستعمال بولي إستر لصناعة الهياكل بعدة طرق منها طريقة الرش للقوالب المفتوحة وطريقة الضغط للمكونات عند حرارة عالية وفي الحالتين يتم وضع شبكة الألياف في عدة طبقات وبترتيبات مختلفة ثم رشها بالبوليمر أو وضعها بالقالب والضغط عليها.

ومن الملاحظ أن معظم لدائن بولي إستر تستخدم في صناعة المواد المركبة وذلك لإنتاج هياكل عديدة ومتنوعة مثل الخزانات والأنابيب والقوارب وأجزاء هياكل السيارات وغيرها.

4- لدائن الأمين(اليوريا والميلامين):

يتم صناعة لدائن الامين من تفاعل فورمالدهيد ذو الرابطة الثنائية عند الاكسجين مع العديد من المركبات المحتوية على الأمين ($-NH_2$). ومن أهم اللدائن المنتجة بوليمر اليوريا فورمالدهيد وبوليمر الميلامين، وتم في كلا الحالتين تكسير

الرابطة الزوجية للفورمالدهايد وإلتحام طرفي النيتروجين في جزئين من الامين مع ذرة كربون الفورمالدهيد، كما تتفاعل ذرتي الهيدروجين في طرفي الأمين مع أكسجين الفورمالدهايد لتكوين الماء كما في المعادلة (7−10) و(7−11)، وهذا ما يعرف بالبلمرة بالتكثيف (**Condensation polymerization**).

$$
\begin{array}{ccccccccccccccccccccccccccccccccc}
H & & O & & H & & & & O & & & & H & & O & & H & & H & & O & & & & & & & & O & & H & & \\
| & & \| & & | & & & & \| & & & & | & & \| & & | & & | & & \| & & & & & & & & \| & & | & & \\
N & - & C & - & N & + & H & - & C & - & H & + & N & - & C & - & N & \xrightarrow{\Delta} & N & - & C & - & N & - & CH_2 & - & N & - & C & - & N & + & H_2O \\
| & & & & | & & & & & & & & | & & & & | & & | & & & & | & & & & | & & & & | & & \\
H & & & & H & & & & & & & & H & & & & H & & H & & & & H & & & & H & & & & H & &
\end{array}
$$

Urea + Formaldehyde + Urea ⟶ Urea-formaldehyde + H_2O (11−7)

وبالمثل في حالة الميلامين:

2 Melamine + Formaldehyde ⟶ Melamine- formaldehyde+H_2O (12−7)

وبإضافة السليولوز (مسحوق الخشب) إلى الميلامين فورمالدهيد أواليوريا فورمالدهيد يتفاعل معهما، وتتكون شبكة بوليميرية متقاطعة، ذات صلابة وصلادة عالية وعزل كهربي جيد مع مقاومة الحرارة حتى 148 دم. ويشتهر الميلامين بسطحه اللامع المقاوم للخدش.

وتستخدم لدائن الميلامين واليوريا فورمالدهايد في الكثير من الصناعات مثل الأواني المنزلية والأثاث المكتبي والمنزلي ويدخل مع الالومنيوم في صناعة القواطع، كما تستخدم اليوريا في حالتها السائلة كغراء للأخشاب.

8.7 المطاط (Rubber):

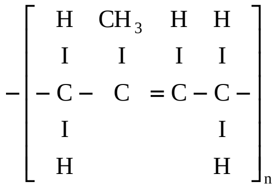
يعتبر المطاط من المواد التي يتغير حجمها و/أو شكلها عند التأثير عليها بقوة خارجية وتعود إلى حالتها الأصلية بعد زوال القوة، وهو ما يعرف بالتغير المرن أي أن هذه المواد لها معامل مرونة كبير. وتنقسم المواد المطاطية إلى مطاط طبيعي وأخر صناعي.

1.8.7 المطاط الطبيعي(Natural Rubber):

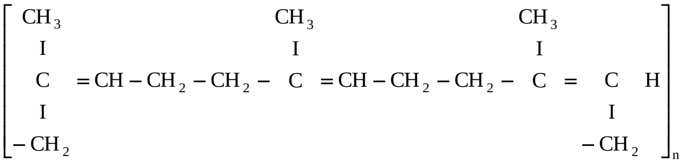
ينتج المطاط الطبيعي من شجرة المطاط (Hevea brasilienis) التي تتواجد في المنطقة الاستوائية، وخاصة في جنوب شرق أسيا، ويستخرج المطاط على شكل سائل لبني من لحاء الشجرة ثم يخفف إلى ما نسبته 15 % ثم يضاف إليه حمض الفورميك لتحويله إلى مادة شبه صلبة، توضع بعد ذلك بين إسطوانات الدرفلة لإزالة الماء وإنتاج صفائح، وهذه تجفف بالهواء الساخن لإزالة ما تبقى من رطوبة. ويمثل المطاط الطبيعي ما نسبته 20 % من الانتاج العالمي من المطاط الطبيعي والصناعي.

يتكون المطاط أساسا من 1، 4 بولي إيزوبرين(**cis-1,4 polyisoprene**) مع مركبات أخرى بنسب قليلة مثل الأملاح العضوية والبروتينات، و تعني البادئة (cis) أن الهيدروجين ومجموعة الميثيل تتواجدان في ناحية واحدة من الرابطة الثنائية.

وهذه الوضعية تساعد على تكوين سلاسل طويلة حلزونية من المطاط. بالمقابل عندما تتواجد الهيدروجين والميثيل على الجانبين (trans) فان تفاعل البلمرة يعمل على تكوين مادة صلدة جامدة لا مرونة لها.



cis-1,4 polyisopreneبولي إيزوبرين 1، 4



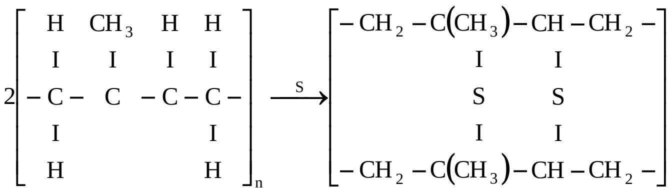
سلسلة بوليمر المطاط الطبيعي

وحتى يتم الإستفادة جيدا من المطاط الطبيعي فإنه يحتاج إلى مواد مضافة كثيرة تزيد من الصلابة ومقاومة الاحتكاك أو تقلل من تأثره بالمذيبات العضوية أو تزيد من تحمله للحرارة، ومن أهم هذه المواد الكبريت والكربون.

1.1.8.7 البركنة (Vulcanization):

البركنة عبارة عن عملية تفاعل كيميائي لتحويل سلاسل البوليميرات إلى شبكة متقاطعة (Cross linked polymer) وبذلك تتكون جزيئات كبيرة من المطاط. ولقد كانت أول محاولة في هذا المجال في سنة 1839 م على يد العالم جوديير، الذي وجد أن بوليميرات المطاط الطبيعي تفاعل مع الكبريت وكربونات الرصاص بالتسخين وتتحول إلى شبكة من البوليميرات ذات خواص ميكانيكية جيدة.

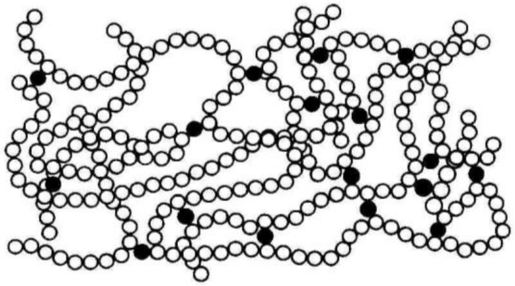
وعلى الرغم أن ميكانيكية حدوث البركنة لازالت غير واضحة المعالم حتى الآن بسبب تعقيدات تفاعل الكبريت، ويعتقد أن بعض الروابط الثنائية تتكسر ويدخل الكبريت كمادة رابطة للسلاسل.



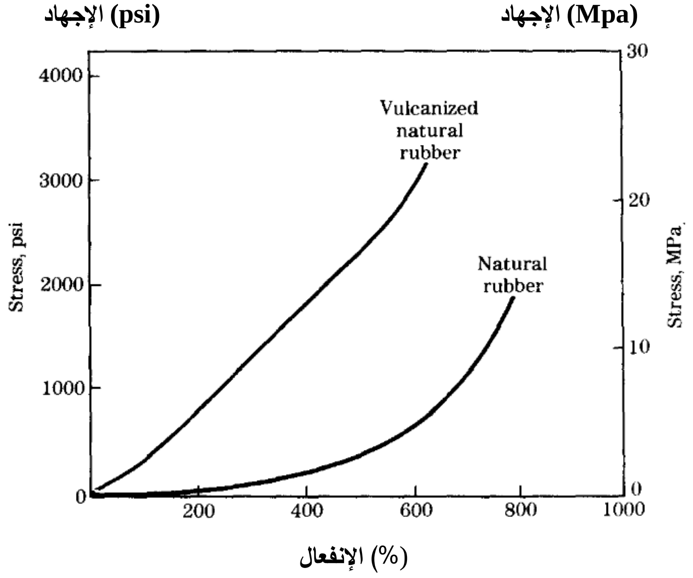
بلمرة بولي إيزوبرين بإضافة الكبريت.

وحيث أن تفاعل المطاط مع الكبريت بطئ جداً، الأمر الذي يحتم رفع درجة حرارة المواد المتفاعلة مابين 100 إلى 200 دم، كما أن مواد أخرى محفزة مثل الملدنات أو مضادات التأكسد كثيرًا ما تضاف لتسريع التفاعل. بالمقابل يضاف مسحوق الكربون (Carbon black) أو سليكات الكالسيوم كمواد مالئة لتزيد من قوة الشد ومقاومة الاحتكاك وزيادة الصلابة (Tear and abrasion resistance)، ويستعمل المطاط الطبيعي بعد المعالجة في صناعة الإطارات للعربات الكبيرة.

ويقوم الكبريت بعمل شبكة مترابطة بين جزيئات وحدات البوليمر كما هو مبين بالشكل (7–7)، وهذا يعمل على زيادة مقاومة المطاط لقوة الشد ويزيد من صلابته وخاصة الصدمات الفجائية، والشكل(7–8) يضع مقارنة بين المطاط الطبيعي والمطاط المعالج بالكبريت.



شكل(6–7) ترابط وتقاطع سلاسل المطاط بدرات الكبريت.



شكل(6–8) تأثير إضافة الكبريت على مقاومة الشد للمطاط.

مثال:

ما هي كمية الكبريت المضافة إلى 100 جرام من المطاط بولي إيزوبرين لتكوين شبكة متقاطعة من البوليمر بما نسبته 5 % من مجموع وحدات البوليمر، بفرض أن الكبريت جميعه قد أستنفد في التفاعل وأن ذرة واحدة فقط من الكبريت تشترك في كل رابطة تقاطع بين الجزيئات.

الحل

من الشكل السابق لبلمرة بولي إيزو برين يتضح أن كل جزئ من البوليمر يحتاج إلى ذرة كبريت واحدة لعمل رابطة تقاطع، وبمعرفة الأوزان الذرية للعناصر يمكن حساب الوزن الجزيئي لوحدة البوليمر ثم عدد المولات من وزن المادة.

$$MW = 5x12 + 8x1 = 68 \quad g/mol$$

$$N(polymer) = \frac{100\ g}{68\ g/mol} = 1.47\ mol$$

وحيث أن المواد تتفاعل بنسب عدد المولات لكل منها، فإن عدد مولات البوليمر تساوي عدد مولات الكبريت، وبهذا يمكن حساب وزن الكبريت للتفاعل مع 100 جرام من البوليمر ومع 5 % من البوليمر فقط.

$$1.74\ mol\ (polymer) = 1{,}74\ mol\ (sulfure)$$

$$Wt\ Sulfure = 1.47\ mol\ x\,32\ g/mol = 47g$$

$$\therefore\ 0.05\ x47 = 2.35g$$

أي أن كمية الكبريت المطلوبة لتكوين روابط متقاطعة بنسبة 5 % من مجموع وحدات 100 جرام من البوليمر يساوي 2.35 جرام.

2.8.7 المطاط الصناعي (Synthetic rubber):

يمثل المطاط الصناعي أكثر من 70 % من مجموع المطاط المستعمل للنواحي الصناعية، ويندرج تحت المطاط الصناعي عدة أنواع مثل ستيرين بيوتادايين ومطاط السيليكون ومطاط النيتريل وغيرها.

1. ستيرين بيوتادايين (Styrene-butadiene):

يعتبر مطاط ستيرين بيوتادايين من أهم أنواع المطاط الصناعي والأكثر إستعمالاً، وتتم عملية البلمرة للمركبين معا بحيث يكون في السلسلة من 20 إلى 23 % ستيرين.

$$\left[\begin{array}{cc} H & H \\ I & I \\ -C- & C- \\ I & I \\ H & (C_6H_6) \end{array}\right]_x - \left[\begin{array}{ccc} H & & H \\ I & & I \\ C & -CH=CH- & C- \\ I & & I \\ H & & H \end{array}\right]_y -$$

بولي ستيرين **بولي بيوتادايين**

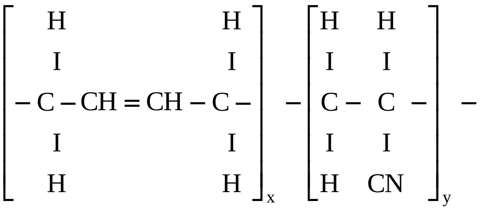
وحيث أن مجموعة بيوتادايين تحتوي على رابطة ثنائية فان هذه الرابطة تتكسر ويحل محلها الكبريت الذي يعمل على تكوين شبكة بوليميرية متقاطعة، وينتج عن التفاعل مطاط ذو صلابة وقوة شد عالية، كما أن وجود حلقة البنزين في البوليمر تعمل على عدم تبلره عند تعرضه للإجهادات الخارجية.

ومن عيوب مطاط ستيرين بيوتادايين أنه يمتص المذيبات العضوية مثل الزيوت والجازولين والهيدروكربونات الخفيفة الأخرى وينتفخ بفعلها ويفقد خواصه، ولذلك لا يستعمل في مثل هذه الظروف. ويستخدم ستيرين بيوتادايين أساساً في صناعة الإطارات للسيارات والعربات.

2. مطاط النيتريل (Nitrile):

يتكون مطاط النيتريل من 55 إلى 82 % بيوتادايين و 18 إلى 45 % أكريلونيتريل في شبكة بوليميرية متقاطعة، وبفعل وجود مجموعة النيتريل فان المطاط

يكون مقاوما جيدا للمواد العضوية مثل البنزين والجازولين والزيوت ويتحمل درجات الحرارة، إلا أنه ذو تكلفة عالية مما يحد من إستعماله سوى في مجالات معينة مثل أنابيب البنزين والجازولين بالمحركات وأطواق منع التسرب للالات والمحركات.

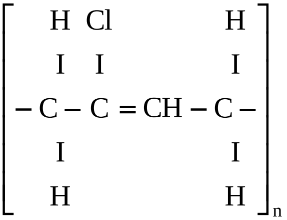


بولي أكريلونيتريل   بولي بيوتادايين

3. بولي كلوروبرين (Polychloroprene):

لقد تم تصنيع بولي كلوروبرين في الثلاثينات من القرن الماضي وذلك عن طريق إستبدال ذرة الكلور محل مجموعة الميثيل في بوليمر إيزوبرين (isoprene) ويعتبر هذا المطاط أكبر مقاومة للحرارة والضوء والأكسحين والأوزون وكذلك للظروف الجوية الأخرى، كما أنه له مقاومة جيدة للمواد الهيدروكربونية إلا أنه أقل ليونة عند درجات الحرارة المنخفضة وأعلى تكلفة من أنواع المطاط الأخرى.

ويستعمل بولي كلوروبرين في تغليف الكوابل وصناعة مواسير المياه والمواد الهيدروكربونية وسيور نقل الحركة وغيرها.

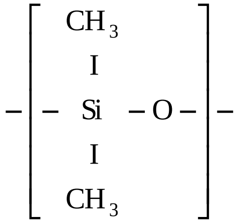


بولي كلوروبرين

4. مطاط السليكون (Silicon rubber):

حيث أن ذرة السليكون رباعية فإنها لها القدرة على تكوين العديد من البوليميرات العضوية، وذلك عن طريق إحلال المجموعات مثل الميثيل أو حلقة البنزين محل إحدى الذرات المرتبطة بالسليكون، ومن الوحدات السليكونية المستخدمة في هذا المجال بولي داي ميثايل سيلوكسان الذي يتفاعل مع بنزيل بيروكسيد عند درجة الحرارة العادية للحصول على مطاط ذو سلاسل متقاطعة.

وتعتبر بوليمرات السليكون ذات أهمية كبيرة، حيث أنها تقاوم درجات الحرارة من 100 إلى 250 دم، مع مقاومة جيدة للرطوبة والظروف الجوية. ويستخدم مطاط السليكون في العديد من الأغراض منها العوازل الكهربية وخاصة ذات الجهد العالي مثل توصيلات الشمعات بالعربات والملف الكهربي وأطواق منع التسرب كما يستعمل في المطابع لنقل الحبر إلى الورق.



بولي ميثايل سيلوكسان

أسئلة الفصل السابع

1. وضح بالرسم الفرق بين ذرة الكربون المشبعة وغير المشبعة.
2. عرف البوليمرات الحرارية والبوليميرات المتصلبة بالحرارة.
3. ما نوع الروابط بين جزيئات البوليميرات المتصلبة بالحرارة.
4. ما هي مميزات البوليميرات المتصلبة بالحرارة.
5. أكتب معادلة البلمرة لجزيئات بولي إثيلين.
6. عرف درجة البلمرة.
7. كيف يتم توقف عملية البلمرة لسلسلة خطية.
8. عرف متوسط الوزن الجزيئي للبوليمر.
9. أكتب الصيغة الكيميائية لوحدات جزيئات البوليميرات الآتية:

بولي فينيل كلوريد، بولي ستيرين، بولي بروبيلين، بولي فينيل أسيتيت.

10. نوع معين من بولي إثيلين له درجة بلمرة تساوي 5850 وحدة لكل مول. أوجد وزنه الجزيئي.
11. بوليمر بولي كربونات تم إنتاجه بطريقة الحقن، له وزن جزيئي يساوي 30000 جرام /مول. أوجد درجة البلمرة لهذا البوليمر.
12. أذكر أنواع ترابط سلاسل البوليميرات بين بعضها البعض.
13. عرف درجة إنتقال البريق للبوليمر.
14. وضح بالرسم طريقة إنتاج المواد البلاستيكية بالحقن، والنفخ مع ذكر أهمية كل منها.
15. ما هي الطرق الأساسية لتصنيع اللدائن المتصلبة بالحرارة.
16. قارن بين الخواص الميكانيكية للدائن الحرارية واللدائن المتصلبة بالحرارة.

17. أذكر أهم خواص النايلون.
18. ما هي وحدة جزئ بوليمر الأسيتال وما هي أهم خواصه وإستعمالاته.
19. مادة بلاستيكية تحتوي على 65 % بولي ستيرين و 35 % بولي أكريلونيتريل. أحسب نسبة عدد المولات لكل بوليمر في هذه المادة.
20. أوجد نسبة عدد المولات لكل من بولي فينيل كلوريد وبولي فينيل أسيتيت في مادة بلاستيكية لها متوسط وزن جزيئي يساوي 10000 جرام/مول ودرجة البلمرة تساوي 140 .
21. ما تأثير الحرارة على الخواص الميكانيكية للبوليميرات الحرارية.
22. أوجد كمية الكبريت المضافة إلى 100 جرام من مطاط إيزوبرين لتكوين شبكة متقاطعة من البوليمر تمثل 7 % وحدات البوليمر، بفرض أن جميع الكبريت قد أستنفد في التفاعل.
23. كم عدد الكيلوجرامات من الكبريت مطلوبة لعمل روابط متقاطعة بنسبة 25 في المائة من مطاط بولي إيزوبرين، إذا كان وزن المطاط قبل التفاعل يساوي 700 كيلوجرام.

الفصل الثامن

المواد المركبة

يوجد هناك عدة تعريفات وتصنيفات للمواد المركبة (materials Composite) والتي لم يتم الإتفاق عليها بعد، فالقواميس اللغوية كثيراً ما تصنف المواد المركبة بأنها مخاليط من عدة مواد، ومن الناحية الهندسية فإن المادة المركبة توصف بأنها المادة التي تحتوي على عدة مواد مختلفة لا تذوب في بعضها البعض ولها خواص ميكانيكية وفيزيائية أفضل من المواد الأصلية. كما أن تصنيفها قد يشمل العديد من المواد مثل الخرسانة والملاط، والخلطة الإسفلتية، والخشب وغيرها، وحيث أن هذه الموضوعات لها تصنيفات أخرى في مجالات الهندسة المدنية، فإن هذا الكتاب سيقتصر على البوليميرات المدعمة بالألياف والمساحيق فقط.

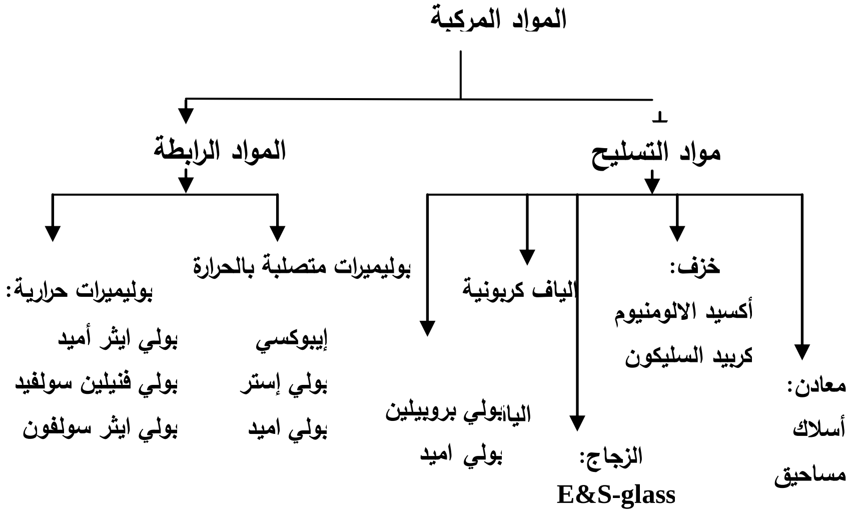
ويرجع إستعمال المواد المركبة إلى سنة 1915 م، عندما تم تصنيع أوراق مقام عليها طلاء من بوليمر الفينول لإستعمالها كعوازل كهربية، ومع نهاية الثلاثينات من القرن الماضي ثم إختراع كل من راتنج الإيبوكسي والألياف الزجاجية.

وتستخدم الألياف لتسليح البوليميرات المتصلبة بالحرارة، والتي تصنع عادة من تفاعل وحدات جزئ البوليمر مع مادة مساعدة على التفاعل، كما هو موضح في الفصل السابع من هذا الكتاب، وللألياف عدة مزايا منها مقاومة الشد العالية بالنسبة للوزن (High strength to weight ratio) ومقاومة للظروف الجوية مع عزل كهربائي وسهولة التصنيع وإنخفاض التكلفة، بالإضافة إلى جساءة وثبات للهياكل المنتجة.

ومع الإهتمام الدولي بإستعمال الهياكل الخفيفة وخاصة في مجال النقل لتخفيض نفقات الطاقة، فإن المواد المركبة قد إحتلت جزاً كبيراً من هذه الصناعة، وتم إستبدال العديد من السبائك المعدنية بالمواد المركبة، ومن أهم إستخدامات المواد المركبة صناعة الأجزاء الداخلية للطائرات والسيارات وهياكل البواخر والخزانات والأنابيب وغيرها، ويعتقد إن المواد المركبة ستواصل تطورها خلال العقود القادمة.

1.8 تصنيف المواد المركبة:

تتكون معظم المواد المركبة من مواد رابطة يمثلها أحد البوليميرات المتصلبة بالحرارة (Thermosetting plastics) مثل الإيبوكسي أو بولي إستر غير مشبع مع مادة تسليح قد تكون من الألياف الزجاجية أو الكربونية أو أسلاك معدنية أو مواد مالئة خزفية والشكل(8–1) يبين الأنواع المختلفة من المواد الرابطة ومواد التسليح المستعملة في صناعة المواد المركبة.

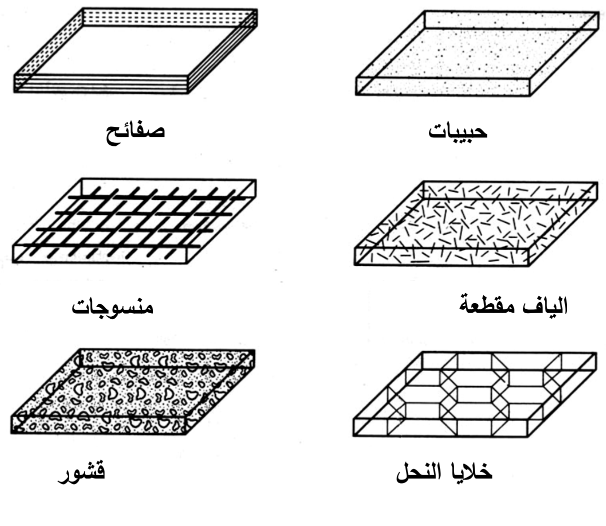


شكل(8–1) مواد التسليح والبوليميرات المستعملة في صناعة المواد المركبة.

2.8 أنظمة تسليح المواد المركبة:

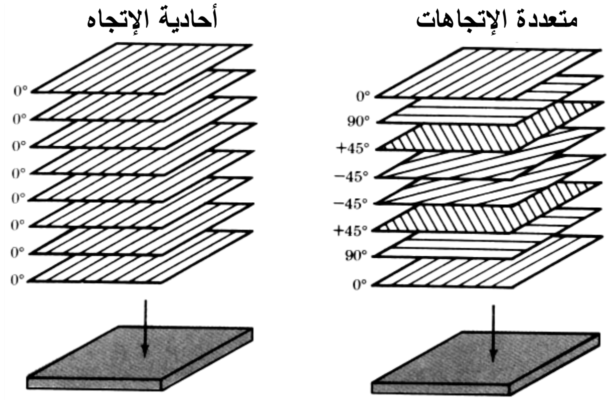
تستعمل مواد التسليح لتحسين الخواص الميكانيكية، ويتم إستخدامها بعدة أنظمة، منها خيوط مستمرة أو ألياف متقطعة أو شبكة منسوجة، وقد تستعمل على شكل مساحيق بالغة النعومة، وتدخل مواد التسليح بنسبة 20 إلى 70 % من الوزن الكلي للمادة المركبة، ويعتمد ذلك على نوعية المواد المستعملة.

ومن الملاحظ أن إضافة مواد التسليح على شكل مساحيق أو قطع صغيرة من الألياف كثيراً ما تزيد من مقاومة الشد والصلابة للمواد المركبة، والأفضل من ذلك إستعمال الخيوط الطويلة أو المنسوجة التي لا يوجد بها انقطاعات، وهذه تعمل على توزيع الأحمال على الهيكل بالتساوي مما يجعله ذو كفاءة عالية، والشكل (8−2) يوضح بعض أنواع أنظمة التسليح المستخدمة في المواد المركبة.



شكل(8−2) بعض أنظمة تسليح المواد المركبة.

كما أن مواد التسليح يمكن لها أن تأخذ عدة تراتيب لعدة طبقات، والشكل **(3-8)** يبين بعض منظومات توزيع الألياف بداخل المادة المركبة، وهذه التراتيب يمكن أن تكون بإتجاه واحد أو متعامدة الطبقات أو بزوايا كما يمكن أن تكون على شكل منسوجات أو ألياف مقطعة أو ألياف مستمرة.



شكل (3-8) تنظيم طبقات تسليح المواد المركبة.

ويؤثر ترتيب مواد التسليح كثيراً على المقاومة النوعية والجساءة النوعية للمواد المركبة، وهذه الخواص لها أهمية كبيرة عند إختيار المواد المركبة الأكثر قوة والأقل وزنا مع المحافظة على الأبعاد، فمثلا قضيب من الصلب يزن أربعة أضعاف قضيب آخر مصنوع بنفس الأبعاد من الإيبوكسي المسلح بالبورون ولهما جساءة متساوية.

ويمكن تعريف المقاومة النوعية بأنها مقدار تحمل المادة لقوة الشد مقسوما على الكثافة، وكذلك فإن الجساءة النوعية تعبر عن مقدار معامل المرونة مقسوما على الكثافة.

3.8 مواد التسليح:

علي مدى أكثر من نصف قرن تم إستعمال العديد من المواد لتسليح المواد المركبة، حيث أستخدمت المنسوجات القطنية مع الفينول وكذلك الورق وهذه المواد تعتبر أقل تكلفة من المواد الأخرى، كما إنتشر إستعمال الاسبستوس على نطاق واسع خلال السبعينات من القرن الماضي في صناعة الأنابيب والأسقف وكوابح السيارات والعربات، وذلك لمقاومته الجيدة للحرارة والإحتكاك ومقاومته العالية للظروف الجوية مع إنخفاض سعر المواد الخام والتصنيع ، إلا أن وجود علاقة بين التعرض إلى غبار الأسبستوس والإصابة بسرطان الرئة للعاملين في هذا المجال أدى إلى الإقلاع عن تصنيع منتجات الأسبستوس في الكثير من الدول مع توالي البحث لإيجاد بدائل له.

من ناحية أخرى فإن تسليح المواد المركبة بالأسلاك المعدنية لم يجد له تطبيقات واسعة لعدة أسباب منها أن الأسلاك المعدنية كثيراً ما تزيد من وزن وكثافة المواد المركبة، كما أنها تجعل عمليات التشكيل والتشغيل على الالات صعبة بالإضافة إلى أن التصاق المواد المركبة بالأسلاك المعدنية عادة ما تكون ضعيفة.

وهناك محاولات كثيرة لإضافة مسحوق المعادن إلى المواد المركبة وذلك لزيادة مقاومة الشد أو جعلها موصلة للكهرباء، وهذه لازالت في طور الدراسة، ولعل أهم التطبيقات في هذا المجال هو إستعمال رقائق الالومنيوم (foil Aluminum) على شكل خلايا النحل لتسليح المواد المركبة والتي تستخدم في صناعة أبواب ومقاعد وأرفف الطائرات.

أما بالنسبة للمواد الخزفية مثل أكسيد الالومنيوم وكربيد ونيتريد السليكون ، فإنها يمكن إستعمالها كمساحيق أو ألياف صغيرة ولم يتم صناعة ألياف طويلة أو منسوجات منها مما يجعل إستعمالها على نطاق محدود.

إن مواد التسليح الأساسية المستعملة على نطاق واسع في المواد المركبة تنحصر في إستخدام الزجاج والكربون وبوليمر الاميد والبورون.

1. الألياف الزجاجية:

يوجد هناك نوعان من المواد المركبة الزجاجية، أولهما المواد المركبة الزجاجية الكهربية (E-glass) ويحتوي الزجاج في هذه الحالة على 52–56 % أكسيد السليكون و12–16 % أكسيد الالومنيوم و 16–25 % أكسيد الكالسيوم و 8–13 % أكسيد البورون ولا يوجد به عنصر الصوديوم، ويعتبر هذا الزجاج أقل تكلفة من الأنواع الأخرى، وتصل مقاومته للشد إلى 3.4 جيجاباسكال ومعامل المرونة إلى 72.3 جيجاباسكال.

أما النوع الثاني فهي الألياف الزجاجية القوية (S-glass) ولها مقاومة شد أكبر من سابقتها حيث تصل إلى 4.48 جيجاباسكال ومعامل المرونة قد يتجاوز 85.4 جيجاباسكال، وهذا الزجاج يتركب من 65 % أكسيد السليكون و 25 % أكسيد الالومنيوم و 10 % أكسيد الماغنيسيوم، ويستخدم هذا النوع من الألياف الزجاجية في الصناعات العسكرية والفضائية مثل هياكل الطائرات والمركبات.

وتصنع الألياف الزجاجية بصهر قطع الزجاج أو المواد الأولية منه في فرن ثم تسحب على شكل خيوط رفيعة بإستخدام قوالب تحدد سمكها، وتجمع في مجموعات من الخيوط الطويلة التي تنسج بعدة أنظمة أو تقطع إلى ألياف قصيرة.

2. الألياف الكربونية:

تمتاز المواد المركبة المصنوعة من راتنج الإيبوكسي والألياف الكربونية بمقاومة الشد العالية وخفة الوزن مع معامل مرونة كبير (Modulus of elasticity)، وهذه الصفات جعلت المواد المركبة الكربونية مفضلة في التطبيقات الفضائية، في حين أن

إرتفاع تكلفتها يحول دون إستخدامها في الكثير من الهياكل الهندسية. والجدول(8−1) يبين الخواص الميكانيكية للألياف الزجاجية والكربونية وبوليميرات الاميد.

جدول(8−1) بعض خواص ألياف المواد المركبة.

الخاصية	ألياف زجاجية كهربية	ألياف كربونية	ألياف الارامید
مقاومة الشد (MPa)	2410	3100	3617
نقطة الخضوع (GPa)	69	220	124
معامل الاستطالة (%)	3.5	1.40	2.5
الكثافة (gm/cm^3)	2.54	1.75	1.48

تصنيع الألياف الكربونية:

تصنع الألياف الكربونية من بولي أكريلونيتريل على ثلاثة مراحل وهي:

ا-التثبيت (Stabilization):

تتم عملية التثبيت بشد خيوط البوليمر لتكوين شبكة أو مجموعة من الخيوط المستقيمة المتوازية، ثم تعرض إلى درجة حرارة تقارب 220 ^{o}م في الهواء الجوي وتحت تأثير الشد بحيث يحدث لها تأكسد.

ب− الكربنة (Carburization):

تحتاج عملية الكربنة إلى تسخين الخيوط السابقة في فرن عند درجة حرارة ما بين 1000 و 1500 دم وفي وجود غاز خامل، بحيث يزال الأكسجين والهيدروجين والنيتروجين من البوليمر وتتحول خيوطه إلى خيوط كربونية ذات مقاومة شد عالية.

ج- **تكوين الكوك** (Graphitization):

تعالج الألياف الكربونية بتسخينها إلى 1800 دم وذلك لتحويل الكربون إلى فحم الكوك المتبلر وهذا يساعد على زيادة معامل المرونة للألياف مع إنخفاض قليل لمقاومة الشد. وتمتاز الألياف الكربونية المنتجة من بولي أكريلونيتريل بمقاومة شد ما بين3.1 إلى 4.45 جيجا باسكال وكثافة من 1.7 إلى 2.1 جم/سم^3 وقطر الألياف يكون عادة مابين 7 إلى 10 ميكرون.

3- **ألياف الاراميد (Aramide fibers):**

ألياف الأراميد عبارة عن خيوط تتكون من راتنج بولي أميد الذي يحتوي على مركبات عطرية حلقية، ولقد تم تصنيعها لأول مرة في سنة 1972 م ويوجد لهذه الألياف عدة أسماء تجارية منها (Kavlar 29) و (Kavlar 49).

ويستخدم جزئ الاميد الذي يحتوي على حلقتي بنزين لتكوين سلاسل طويلة من البوليمر ذات إتجاه أحادي وبذلك يكون البوليمر أو الألياف المصنوعة منه ذات قوة شد كبيرة في إتجاه واحد وقليلة القوة في الإتجاه العمودي لها.

$$\text{--[-CO-}(C_6H_6)\text{-CO-NH--}(C_6H_6)\text{-NH-]}_n\text{---}$$

جزئ بولي أميد

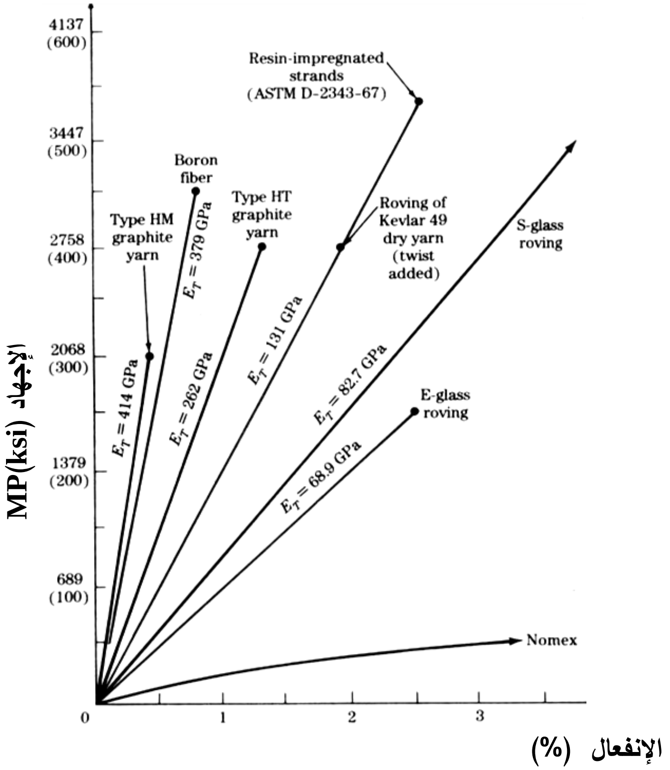
4.8 خواص مكونات المواد المركبة:

1. الألياف:

يوضح الشكل(**8-4**) يوضح العلاقة بين الإجهاد والإنفعال للعديد من الألياف المستعملة لتسليح المواد المركبة، ومن الملاحظ أن مقاومة الشد للألياف متباينة بين

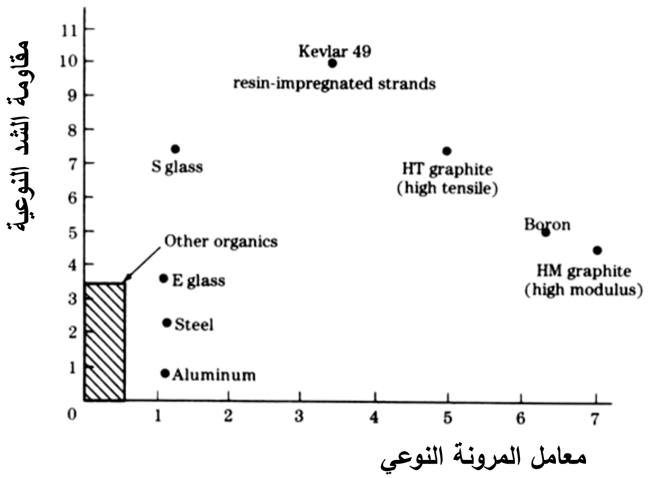
1720 ميجاباسكال للزجاج الكهربي (E-glass) و 3440 ميجاباسكال للزجاج عالي قوة الشد (S-glass) بينما إجهاد الكسر قد لا يتجاوز 0.4 % لخيوط الجرافيت عالي المرونة وقد يتجاوز 4 % للزجاج عالي الشد.

ومن الملاحظ كذلك أن الألياف الكربونية تتصف بمقاومة شد عالية وجساءة جيدة أي معامل مرونة كبير، وكثافة منخفضة إلا أن ما يعيبه المطيلية القليلة وهو ما يجعله لا يقاوم الصدمات . بالمقابل يعتبر كفلار 49 (وهو من مجموعة أراميد) ذو مطيلية عالية ومقاومة شد عالية كذلك ومعامل مرونة أقل بقليل مما هو للألياف الكربونية، والجدول(**8-2**) يبين بعض خواص الألياف المستعملة في المواد المركبة.



شكل (8-4) العلاقة بين الإجهاد والإنفعال للألياف (E_T:معامل المرونة).

ومن الناحية التطبيقية، فإن قوة الشد والمرونة لها إرتباطاً وثيقاً بالكثافة أي أن المطلوب هندسيا هو الأكثر مقاومة للإجهادات والأخف وزناً. والشكل **(8–5)** يبين مقارنة لمقاومة الشد النوعية ومعامل المرونة النوعي أو ما يسمى بالمتانة (Stiffness) لأهم الألياف المستعملة في صناعة المواد المركبة، وكذلك الصلب والالومنيوم. وهذه المقارنة توضح أن الألياف الكربونية وألياف الاراميد (Kevlar 49) تحقق مقاومة شد نوعية عالية مقارنة بالالومنيوم والصلب، وهذا ما جعل المواد المركبة تعتبر المنافس الرئيسي للالومنيوم في صناعة الأجسام الطائرة.



الشكل (8–5) مقاومة الشد النوعية ومعامل المرونة النوعي للألياف.

2. المواد الرابطة:

ترتكز المواد الرابطة على راتنج الإيبوكسي وراتنج بولي إستر غير مشبع كمواد أساسية رابطة لمعظم الألياف المستعملة في المواد المركبة، ولقد تم الإشارة إلى تفاعلات البلمرة لهذين المركبين في الفصل السابع من هذا الكتاب. وكما أسلفنا فإن

ناتج التفاعل يتكون من شبكة بوليمرية متقاطعة. والجدول(**8−2**) يبين الخواص الفيزيائية والميكانيكية لبوليميرات الإيبوكسي وبولي إستر غير مشبع.

جدول(8−2) بعض خواص بوليميرات الإيبوكسي وبولي إستر.

الخواص	**بولي إستر غير مشبع**	**إيبوكسي**
مقاومة الشد (MPa)	90 – 40	130 -55
معامل المرونة (GPa)	4.4 - 2	4.2 – 2.8
مقاومة الصدم (ايزود – J/m)	21.2 – 10.6	53 - 5.3
الكثافة (gm/cm^3)	1.46 – 1.1	1.3 – 1.2

5.8 الخواص الميكانيكية للمواد المركبة:

سنتعرض في هذا الفصل إلى المواد المركبة الأكثر إستعمالا في تصنيع الهياكل مثل أجسام البواخر والقوارب والسيارات والخزانات وأجزاء الطائرات وغيرها.

1. بولي إستر مسلح بالألياف الزجاجية:

تعتمد مقاومة الشد في هذه المواد على الألياف الزجاجية، فكلما كانت نسبة الألياف كبيرة (والتي قد تصل إلى 80 % بالوزن) كلما كانت المادة المركبة ذات مقاومة شد عالية، كما تعتمد في الدرجة الثانية على طريقة توزيع هذه الألياف، والجدول **(8−3)** يقدم مقارنة للخواص الميكانيكية لبولي إستر مسلح بمنسوجات وألياف مقطعة وأخري طولية مستمرة.

جدول (8–3) الخواص الميكانيكية لبوليمر بولي إستر مسلح بألياف زجاجية.

الخواص	منسوجات	ألياف مقطعة	خيوط مستمرة
مقاومة الشد (MPa)	344 – 206	206 -103	138 - 55
معامل المرونة (GPa)	310 - 103	138 – 55	----
مقاومة الصدم (ايزود – J/m)	1600 – 267	1070 - 107	1175-374
الكثافة (gm/cm^3)	2.1 – 1.5	2.3 – 1.35	2 – 1.65

ويلاحظ أنه عند إستعمال خيوط مستمرة طويلة متوازية الإتجاه، فإن مقاومة الشد تكون منخفضة، وتزداد في حالة الألياف المقطعة العشوائية الإتجاه وكذلك للمنسوجات ذات إتجاهين.

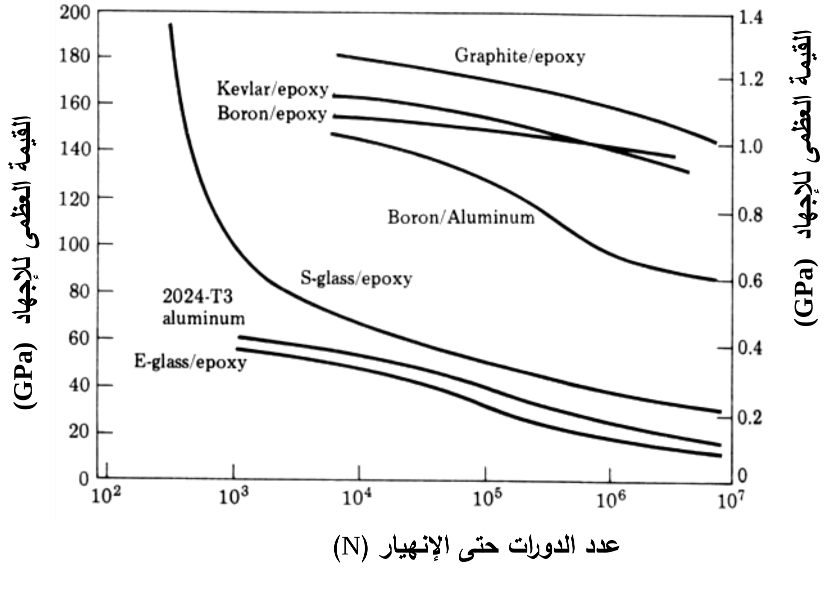
2. إيبوكسي مسلح بالألياف الكربونية:

يستعمل بوليمر الإيبوكسي كوسط رابط للألياف عامة والكربونية خاصة، وذلك أن الإيبوكسي يمتاز بقوة ترابطه مع الألياف ومقاومته الكبيرة للمواد الكيميائية والعوامل الجوية، كما أنه أقل عرضة لتشققات الإنكماش الناتجة من التجفيف ،وتستخدم البوليميرات الرابطة الأخرى مثل بولي اميد وبولي فينيلين سولفيد أو بولي سولفون في بعض التطبيقات الهندسية الأخرى.

وتعتمد مقاومة الشد على الألياف الكربونية في حين أن الإيبوكسي يوفر وسطا للربط والتثبيت كما أنه يساهم في زيادة مقاومة الصدم للمادة المركبة وكذلك جساءة الهيكل. وبذلك فإن المواد المركبة المصنوعة من بوليمر الإيبوكسي المدعم بالألياف الكربونية تتصف بمقاومة الشد العالية، ومعامل المرونة الكبير، مع كثافة

منخفضة، وهذا يجعلها تلعب دوراً بديلاً للسبائك والمعادن الخفيفة مثل سبائك الالومنيوم والتيتانيوم وخاصة في مجال الفضاء.

وما يشجع كذلك على إستعمال المواد المركبة الكربونية أنها لها مقاومة عالية للكلال، وتأتي في المرتبة الثانية المواد المركبة المدعمة بالاميد والمدعمة بالبورون، وهذه المواد جميعها تظهر مقاومة للكلال أكبر من سبيكة الالومنيوم 2024 الشهيرة كما هو موضح بالشكل(8-6).



الشكل(8–6) مقاومة المواد المركبة للكلال.

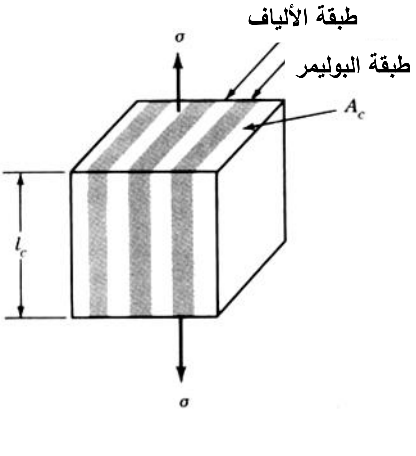
5.8. 1 معامل المرونة للمواد المركبة:

تحتوي المواد المركبة على المادة الرابطة التي يمثلها البوليمر ومادة التسليح التي يمثلها الألياف، فإن الإجهاد والإنفعال يمكن أن يؤثر على كليهما أو أحداهما

تبعا لنوع التحميل، وهناك العديد من أنواع التحميل ولكننا سنقتصر على نوعين رئيسيين للتعريف بالموضوع.

1. حالة الإنفعال المتساوي (Isostrain condition):

عند وجود عدة طبقات من المادة الرابطة ومادة التسليح كما بالشكل(**8−7**)، وأن القوة المؤثرة في إتجاه الألياف، وبفرض أن قوة الالتصاق بين الطبقات عالية ولا تتأثر بالتحميل، فإن كمية الإجهاد تكون متساوية لطبقة البوليمر ولطبقة الألياف وهو ما يعرف بحالة الإنفعال المتساوي (Isostrain condition).



شكل(8−7) تحميل متساوي الإنفعال.

وبذلك فإن القوة الكلية المؤثرة على المادة المركبة تساوي مجموع قوتي تحميل البوليمر والألياف:

$$F_c = F_f + F_m \qquad (1-8)$$

$$\because \quad \sigma = \frac{F}{A} \quad \therefore \quad F = \sigma A \qquad (2-8)$$

$$\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \qquad (3-8)$$

حيث أن:

F_c : مقاومة الشد للمادة المركبة.

F_f : مقاومة الشد للألياف.

F_m : مقاومة الشد للبوليمر.

σ : إجهاد الشد للمادة المركبة.

A : مساحة المقطع.

m,f,c : ترمز إلى المادة المركبة ،والألياف، والبوليمر على التوالي.

وحيث أن طول طبقة الألياف والبوليمر متساوية فإن مساحات المقطع يمكن إستبدالها بالحجم الجزئي لكل منها.

$$V_c = A_c L_c \qquad (4-8)$$

$$V_f = A_f L_f \qquad (5-8)$$

$$V_m = A_m L_m \qquad (6-8)$$

$$\because \quad L_c = L_m = L_f$$

وبضرب طرفي المعادلة (8 -3) في الطول (L_c)

$$\therefore \quad \sigma_c V_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \qquad (7-8)$$

وحيث أن الحجم الجزئي للمادة المركبة تساوي الواحد الصحيح (V_c=1.0)

$$\therefore \ \sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \qquad (8-8)$$

وكما أوضحنا سابقا بأنه في حالة الإلتصاق الكامل بين الطبقات يكون الإنفعال متساوي، أي الإستطالة متساوية (Isostrain).

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m \qquad (9-8)$$

وبقسمة المعادلة (8 -8) على المعادلة (8 -9) نتحصل على معامل المرونة:

$$\frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = \frac{\sigma_f V_f}{\varepsilon_f} + \frac{\sigma_m V_m}{\varepsilon_m} \qquad (10-8)$$

وحيث أن معامل المرونة يساوي الإجهاد مقسوما على الإنفعال لكل طبقة، فإنه يمكن إيجاد معامل المرونة الكلي للمادة المركبة بدلالة معامل المرونة لكل طبقة والحجم الكلي لكل منها كما في المعادلة (8-11)، وهذه المعادلة تعرف بقاعدة المخاليط (Rule of mixtures) للمواد المركبة الثنائية، أي يمكن تطبيقها عند وجود بوليمر واحد ومادة تسليح واحدة.

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \qquad (11-8)$$

كما يمكن إيجاد نسبة القوة المؤثرة على الألياف إلى القوة المؤثرة على البوليمر من معامل المرونة والحجم الجزئي كما يأتي:

$$\frac{F_f}{F_c} = \frac{\sigma_f A_f}{\sigma_m A_m} = \frac{E_f \varepsilon_f A_f}{E_m \varepsilon_m A_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m} \qquad (12-8)$$

$$F_c = F_f + F_m$$

وبذلك فإن المعادلتين السابقتين يمكن بهما إيجاد القوة المؤثرة على الألياف وعلى البوليمر.

مثال:

مادة مركبة مصنوعة من 60 % بالحجم ألياف بولي أميد (Kevlar 49) تم ترتيبها على شكل أحادي الإتجاه، و 40 % راتنج الإيبوكسي. فإذا كانت كثافة الألياف تساوي 1.48 جم/سم^3 وكثافة الإيبوكسي تساوي 1.2 جم/سم^3 أوجد:

أ- النسبة المئوية بالوزن لكل من الألياف والبوليمر في المادة المركبة.

ب-الكثافة النسبية (متوسط الكثافة) للمادة المركبة.

الحل

$$\because \quad \rho = \frac{m}{V} \qquad\qquad \therefore \quad m = \rho \; V$$

ومنها يمكن حساب كتلة الألياف (ρ_f) والإيبوكسي (ρ_m) في المادة المركبة (بفرض أن الحجم الكلي للمادة المركبة يساوي الواحد الصحيح):

$$m_f = \rho_f \; V_f \; = 1.48 \times 0.6 = 0.888 \quad gm$$

$$m_m = \rho_m \, V_m \; = 1.2 \times 0.4 = 0.480 \quad gm$$

والمجموع يساوي 1.368 جرام

ومنها يمكن الحصول على النسبة المئوية بالوزن للالياف وللإيبوكسي، كما يمكن حساب متوسط الكثافة للمادة المركبة:

$$w_f = \frac{0.888}{1.368} \times 100 = 64.9\%$$

$$w_m = \frac{0.480}{1.368} \times 100 = 35.1\ \%$$

$$\rho_c = \frac{m}{V} = \frac{1.3680\ \ gm}{1\ cm^3} = 1.37\ \ gm/cm^3$$

حيث أن:

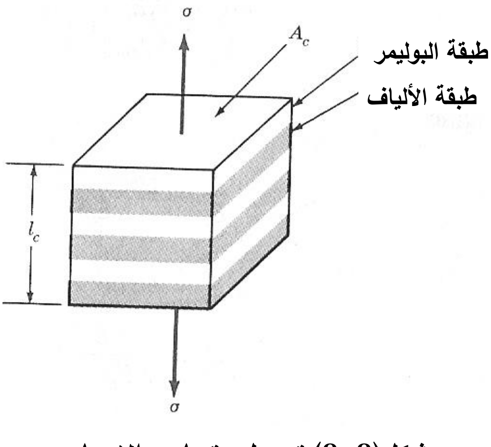
W_f : النسبة المئوية بالوزن للألياف.

W_m : النسبة المئوية بالوزن للإيبوكسي.

ρ_c : الكثافة النسبية للمادة المركبة.

2. التحميل عند تساوي الإجهاد:

عند تحميل المادة المركبة بقوة إجهاد عمودية على إتجاه الطبقات كما بالشكل(**8-8**)، وبفرض حالة مثالية (لتبسيط الأمر) بأن الإجهاد المؤثر على كل الطبقات يكون متساوياً، وهو ما يعرف بحالة تساوي الإجهاد (Isostress codition).



شكل(8-8) تحميل متساوي الإجهاد.

فإن معامل المرونة للمادة المركبة يمكن الحصول عليه من تساوي الإجهادات وتساوي مساحة المقطع ومن أن الإنفعال للمادة المركبة يساوي مجموع الإنفعال للبوليمر وللألياف:

$$\therefore\ \sigma_c = \sigma_f = \sigma_m \qquad (13-8)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f + \varepsilon_m \qquad (14-8)$$

$$A_c = A_f = A_m \qquad (15-8)$$

$$V_c = A_c\ L_c = 1.0$$
$$V_f = A_f\ L_f$$
$$V_m = A_m\ L_m$$
$$\because \quad L_c = L_m + L_f$$

$$\therefore\ \varepsilon_c V_c\ L_c = \varepsilon_f\ V_f\ L_f + \varepsilon_m\ V_m\ L_m$$
$$\therefore\ \varepsilon_c = \varepsilon_f\ V_f + \varepsilon_m\ V_m \qquad (16-8)$$

وبفرض أن هذه الحالة خاضعة لقانون هوك، أي أن الإجهاد والإنفعال في المنطقة المرنة:

$$\therefore\ \varepsilon_c = \frac{\sigma}{E_c} \quad \& \quad \varepsilon_f = \frac{\sigma}{E_f} \quad \& \quad \varepsilon_m = \frac{\sigma}{E_m} \qquad (17-8)$$

وبالتعويض عن قيم الإنفعال في المعادلة (8-16) وبما أن الإجهاد متساوي فإن :

$$\frac{\sigma}{E_c} = \frac{\sigma V_f}{E_f} = \frac{\sigma \ V_m}{E_m} \qquad (18-8)$$

$$\therefore \frac{1}{E_c} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \qquad (19-8)$$

وبضرب البسط والمقام في معامل المرونة نتحصل على معامل المرونة للمادة المركبة بدلالة معامل المرونة والحجم الجزئي للألياف والبوليمر:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_f \ E_m}{E_f \ E_m} + \frac{V_m \ E_f}{E_m \ E_f}$$

$$\therefore \ \frac{1}{E_c} = \frac{V_f \ E_m + V_m \ E_f}{E_f \ E_m} \qquad (20-8)$$

$$\therefore \ E_c = \frac{E_f \ E_m}{V_f \ E_m + V_m \ E_f} \qquad (21-8)$$

مثال:

مادة مركبة تتكون من 60 % بالحجم ألياف زجاجية كهربية (E-glass) مع بوليمر الإيبوكسي، فإذا كان معامل المرونة للألياف يساوي 72 جيجاباسكال وإجهاد الشد له يساوي 2.4 جيجاباسكال ومعامل المرونة للإيبوكسي بعد التصلب يساوي 3.1 جيجاباسكال وإجهاد الشد يساوي 62 ميجا باسكال. أوجد:

أ- معامل المرونة للمادة المركبة.

ب-مقاومة الشد للمادة المركبة.

ت-نسبة التحميل على الألياف بالنسبة للمادة المركبة.

الحل

أ- معامل المرونة للمادة المركبة:

بفرض أن حجم الألياف وحجم البوليمر يساوي حجم المادة المركبة ويساوي الواحد الصحيح، فإن معامل المرونة للمادة المركبة تساوي:

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m$$
$$= (72 \times 0.6) + (3.1 \times 0.4) = 44.44 \text{ GP}$$

ب-مقاومة الشد للمادة المركبة:

حيث أن وزن المادة المركبة تساوي مجموع وزني الألياف والبوليمر إذن:د

$$\sigma_c V_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m$$
$$= (2.4 \times 0.6) + (0.62 \times 0.4)$$
$$= 1.46 \text{ GP} \qquad (V_c = 1.0)$$

ت- نسبة التحميل على الألياف بالنسبة للمادة المركبة.

$$\frac{F_f}{F_c} = \frac{E_f V_m}{V_m E_m + V_f E_f} = \frac{72 \times 0.6}{(72 \times 0.6) + (3.1 \times 0.4)} = 0.97$$

6.8 تصنيع المواد المركبة:

هناك عدة طرق لتصنيع المواد المركبة يمكن تقسيمها إلى مجموعتين رئيسيتين وهما طريقة القالب المفتوح وطريقة القالب المغلق.

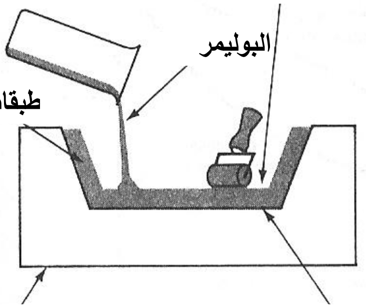
1.6.8 التشكيل بالقوالب المفتوحة (Open mould):

تعتمد طريقة القالب المفتوح على وضع الألياف على قالب مفتوح بالطريقة اليدوية ورش البوليمر أو طرحه بالفرشاة لتكوين طبقة أو عدة طبقات من البوليمر والألياف ومن هذه الطرق ما يأتي:

1- الفرش اليدوي (Hand lay-up):

تعتبر هذه الطريقة من أبسط الطرق لتصنيع المواد المركبة، فمثلا عند تصنيع هيكل أو ألواح بوليمر الإيبوكسي والألياف الزجاجية بهذه الطريقة يتم طلاء القالب المفتوح بمادة جيلاتينية تساعد على نزع الهيكل من القالب بعد الجفاف، يلي ذلك وضع طبقة من الإيبوكسي السائل بالرش أو بإستعمال الفرشاة، تم توضع الألياف الزجاجية، يليها طبقة البوليمر، وهكذا حتى الحصول على السمك المطلوب كما بالشكل(**8-9**)، وتضاف عادة مواد محفزة للتفاعل مع البوليمر لتسريع التصاقه بالألياف وجفافه.

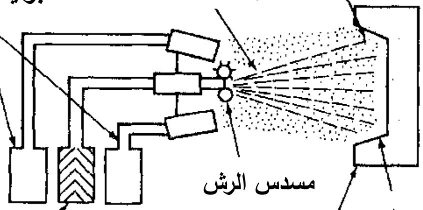
وفي كل حالة تغمر الألياف بالكامل في البوليمر مع التحريك أو الضغط الخفيف للتخلص من فقعات الهواء، وبعد ذلك يترك القالب ليجف في الهواء الجوي أو يمرر عليه هواء ساخن. وتستعمل طريقة الفرش اليدوي لصناعة هياكل القوارب والألواح المستخدمة في المباني والخزانات وصحون الاستقبال المرئي وغيرها.



شكل(8–9) طريقة الفرش اليدوي.

2- طريقة الرش (Spray-up):

تتشابه هذه الطريقة مع طريقة الفرش اليدوي في وجود قالب مفتوح له شكل الهيكل المطلوب صناعته، ويتم في هذه الحالة رش للألياف المقطعة والبوليمر في آن واحد، ويستمر الرش حتى الحصول على السمك المطلوب. ويتم التجفيف في الهواء الجوي أو بإستعمال هواء ساخن لتعجيل تصلب المادة المركبة.



الشكل(8–10) طريقة رش الألياف.

3- طريقة التفريغ (Vacuum process):

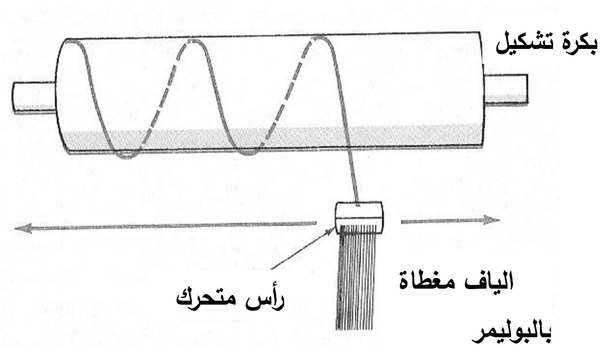
تتلخص طريقة التفريغ في تحضير طبقات رقيقة من الألياف الزجاجية أو الكربونية والتي تكون عادة أحادية الإتجاه، وبعد أن تكون نصف جافة تقطع تبعا لمقاسات القالب وترص على عدة طبقات وباتجاهات مختلفة وذلك للحصول على خواص ميكانيكية معينة، وبعد ذلك يتم تثبيتها جيداً بداخل القالب وتوضع بداخل كيس وتخضع لعملية تفريغ للتخلص من الهواء في المادة المركبة ثم تسخن إلى درجة حرارة تقارب 100 درجة مئوية بالنسبة للإيبوكسي والألياف الزجاجية و 190 دم للإيبوكسي والألياف الكربونية، وهكذا تندمج الطبقات مع بعضها البعض لتكوين هيكل خفيف الوزن وذو مقاومة شد عالية ومعامل مرونة عالي جداً.

وهذه الطريقة تستخدم للألياف الكربونية المستعملة في صناعة أجنحة الطائرات وأجزاء المركبات الفضائية، ويمكن إستخدامها في حالة الألياف الزجاجية للهياكل الأقل تكلفة مثل هياكل السيارات والخزانات.

5. طريقة اللف (Filament winding):

تستعمل طريقة اللف لصناعة الهياكل الاسطوانية المفرغة، ويستخدم لذلك قالب تشكيل محوري (Mandrel) يمكن لفه بسهولة مع تغذية سطحه بألياف مستمرة تم غمسها في وعاء به بوليمر الإيبوكسي والمادة المحفزة على شكل سائل، ويقوم حامل تغذية الألياف بتوزيع الألياف بالتساوي على سطح قالب التشكيل.

ويمكن تكوين عدة طبقات دائرية من الألياف حسب السمك المطلوب، والشكل**(8-11)** يوضح خطوات عملية التصنيع. ويتم تجفيف الاسطوانة في الهواء الجوي أو في الفرن ثم تنزع إسطوانة المادة المركبة من القالب بعد التصلب.



شكل(8–11) طريقة اللف.

ومن الملاحظ أن هذه الطريقة تمتاز بسرعة التصنيع ودقة العمل مما يكسب الهياكل الاسطوانية المصنعة مقاومة شد عالية، ولذا فإن تشكيل المواد المركبة بطريقة اللف تكون مناسبة لصناعة خزانات الضغط العالي وخزانات الوقود وكذلك غلاف المحركات للصواريخ.

2.6.8 التشكيل بالقوالب المغلقة:

يوجد العديد من طرق التشكيل للمواد المركبة في القوالب المغلقة والتي تعمل ألياً في معظم الأحيان، وتمتاز بالإنتاجية العالية:

1– التشكيل بالحقن والضغط:

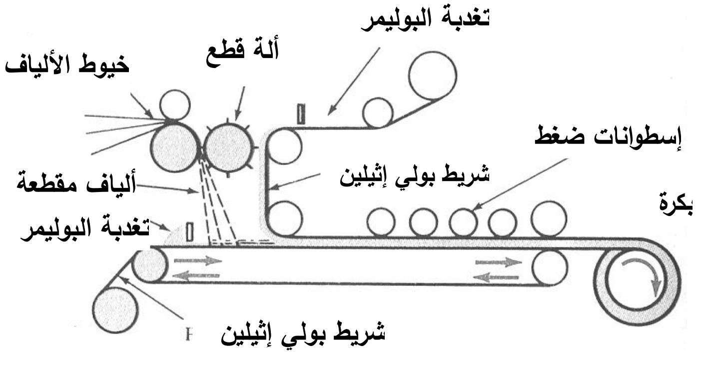
تشكيل المواد المركبة بالحقن (Injection Molding) أو بالضغط (Compression Molding) لا يختلف عن تشكيل المواد البلاستيكية بالضغط أو بالحقن كما سبق دراسته في الفصل السابع من هذا الكتاب، إلا أن في هذه الحالة تضاف الألياف

المقطعة إلى البوليمر ويتم حقنها أو ضغطها في القالب المغلق ثم فتحه بعد التصلب لإخراج المشغولات المصنعة.

2- التشكيل بالتغطية البلاستيكية (Sheet molding (SMC)):

يعتبر تشكيل المواد المركبة بالتغطية البلاستيكية من التقنيات الحديثة لصناعة الهياكل بمختلف الأشكال والأحجام.

وتتم عملية التصنيع بتغذية شريط بولي اثيلين من بكرة إلى سير التصنيع حيث يغمر سطحه بالبوليمر ثم يرش عليه الألياف (الزجاجية مثلا بطول يقارب 5 سم لكل منها)، يلي ذلك تغطيتها بشريط بولي اثيلين آخر من أعلى تم تغذيته من بكرة مثبتة في ناحية مكان الرش، بحيث يكون البوليمر والألياف في وسط شريطي بولي إثيلين، وبعد ذلك يعرض إلى إسطوانات ضاغطة يمكن بها تحديد سمك طبقة المادة المركبة، وتساعد كذلك على إمتزاج الألياف بالبوليمر، وفي النهاية يتم لف المادة المركبة على بكرات تترك لمدة من يوم إلى أربعة أيام لتجف، والشكل (8-12) يوضح الخطوات الرئيسية للتصنيع.



شكل(8-12) طريقة التغطية البلاستيكية.

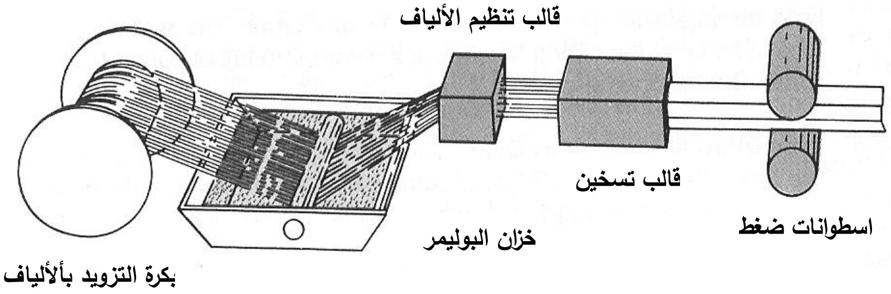
وتستعمل المادة المركبة في هذه الحالة كمصدر لتصنيع العديد من الهياكل، وذلك بتقطيع أجزاء منها حسب الأشكال والأحجام التي سيتم تصنيعها ثم توضع في قوالب لها شكل المشغولة المزمع إنتاجها ثم تعرض إلى ضغط يقارب 6.9 ميجاباسكال ودرجة حرارة تقارب 149 دم ، وقد يضاف الطلاء في هذه المرحلة لتحسين نعومة السطح.

والجدير بالذكر أن عملية التشكيل بالتغطية البلاستيكية من الطرق المهمة، لما لها من مزايا أهمها دقة في التصنيع وإنتظام ونعومة عالية للسطح مع خواص ميكانيكية جيدة، وتستعمل هذه الطريقة لصناعة هياكل السيارات والعربات وغيرها.

3. التشكيل بالسحب (Continuous pultrusion):

تستعمل طريقة السحب التي تشابه سحب النحاس أو الحديد بتمرير ألياف مستمرة من بكرة على حوض به بوليمر والمادة المحفزة، بحيث تتشبع الألياف، ثم تمر على قالب لتنظيم أوضاع الألياف، يلي ذلك دخول الألياف إلى قالب التشكيل المجهز بوسيلة تسخين لتجفيف البوليمر والألياف وفي نفس الوقت يتم سحب الألياف من الأمام للحصول على مقاومة شد عالية (وهذا مشابه لصناعة الخرسانة سابقة الإجهاد).

ومن الملاحظ أنه يمكن تغيير شكل قالب التثبيت للألياف وقالب التشكيل للحصول على العديد من الأشكال الهندسية مثل الزاوية والمربع والمجرى والاسطوانة وغيرها. والشكل(8–13) يبين طريقة التصنيع.



شكل(8–13) طريقة التشكيل بالسحب.

أسئلة الفصل الثامن

1. عرف المواد المركبة.
2. ما هي الألياف الأكثر إستعمالاً في تصنيع المواد المركبة.
3. ما هي مزايا إستخدام الألياف الزجاجية.
4. كيف يؤثر ترتيب الألياف على مقاومة الشد للمادة المركبة.
5. ما الفرق بين الزجاج الكهربي والزجاج غير الكهربي.
6. لماذا تستعمل الألياف الكربونية كثيراً في المجالات الفضائية.
7. عرف مقاومة الشد النوعية.
8. ما مدى مقاومة المواد المركبة لإجهاد الكلال.
9. مادة مركبة بلاستيكية تحتوي على ألياف كربون وحيدة الإتجاه بنسبة 62 % بالحجم و 38 % وراتنج الإيبوكسي. أوجد النسبة المئوية بالوزن لكل من الإيبوكسي والألياف، وما هو متوسط كثافة المادة المركبة؟ علما بأن كثافة ألياف الكربون تساوي 1.75 جرام/سم^3 وكثافة الإيبوكسي تساوي 1.2 جرام/سم^3 .
10. متوسط كثافة مادة مركبة تحتوي على ألياف الكربون وراتنج الإيبوكسي تساوي 1.6 جرام/سم^3 . فإذا كانت كثافة الإيبوكسي تساوي 1.22 جرام/سم^3 وكثافة الألياف تساوي 1.76 جرام/سم^3 ، أوجد النسبة المئوية بالحجم لكل من الألياف والراتنج، وما هي نسبة الإيبوكسي بالوزن في المادة المركبة.
11. مادة مركبة تحتوي على 62 % بالحجم ألياف كربونية أحادية الإتجاه و 38 % راتنج الإيبوكسي، تعرضت إلى قوة إجهاد بتساوي الإنفعال (isostraine) . أوجد معامل المرونة للمادة المركبة إذا كان معامل المرونة للألياف الكربونية

يساوي 372 جيجاباسكال، ومعامل المرونة للإيبوكسي يساوي 4.8 جيجاباسكال.

12. أوجد معامل المرونة لراتنج الإيبوكسي المدعم بنسبة 63 % بالحجم من الالياف الكربونية إذا تعرضت هذه المادة إلى إجهاد شد عند تساوي الإجهاد 0 . علماً بأن معامل المرونة للألياف يساوي 230 جيجاباسكال ومعامل المرونة لراتنج الإيبوكسي يساوي 4.8 جيجاباسكال.
13. تحدث عن ألياف الأراميد.
14. قارن بين الألياف الزجاجية والكربونية وألياف الأراميد من حيث الكثافة ومقاومة الشد والمطولية.
15. قارن بين تصنيع المواد المركبة في القوالب المفتوحة والقوالب المغلقة.
16. وضح أهمية وخطوات تصنيع المواد المركبة بطريقة الفرش اليدوي.
17. وضح بالرسم خطوات تصنيع المواد المركبة البلاستيكية بطريقة الرش.
18. ما هي أهم مزايا ومنتوجات تصنيع المواد المركبة بطريقة اللف.
19. بين أهمية تصنيع المواد المركبة بطريقة التشكيل بالسحب.

الفصل التاسع

المواد الخزفية

تعتبر المواد الخزفية مواد غير عضوية غير مغناطيسية، وتتكون من مركبات معظمها أكاسيد المعادن، مترابطة مع العناصر غير المعدنية بروابط أيونية أو تساهمية. وتصنع الخزفيات التقليدية من أطيان معقدة في تركيبها الكيميائي وترتيبها البلوري مع تفاوت كبير في خواص المواد الأولية مما يؤدي إلى تنوع في الخواص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية للخزفيات. الجدول (9-1) يوضح أهم الخامات المعدنية للسليكا التي تعتبر من المكونات الرئيسية في الأطيان.

جدول(9. 1) يوضح أهم الخامات المعدنية للسليكا .

Silica:	
Quartz	
Tridymite	Common crystalline phases of SiO_2
Cristobalite	
Alumina silicate:	
Kaolinite (china clay)	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$
Pyrophyllite	$Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$
Metakaolinite	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$
Sillimanite	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$
Mullite	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$
Alkali alumina silicate:	
Potash feldspar	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$
Soda feldspar	$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$
(Muscovite) mica	$K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$
Montmorillonite	$Na_2O \cdot 2MgO \cdot 5Al_2O_3 \cdot 24SiO_2 \cdot (6 + n)H_2O$
Leucite	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$
Magnesium silicate:	
Cordierite	$2MgO \cdot 5SiO_2 \cdot 2Al_2O_3$
Steatite	$3MgO \cdot 4SiO_2$
Talc	$3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$
Chrysotile (asbestos)	$3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$
Forsterite	$2MgO \cdot SiO_2$

أما الخزفيات الثقنية الحديثة، فإن منها ما هو بسيط التركيب ذو خواص محددة، ومنها ما يحتوي على عدة أطوار والعديد من المركبات.

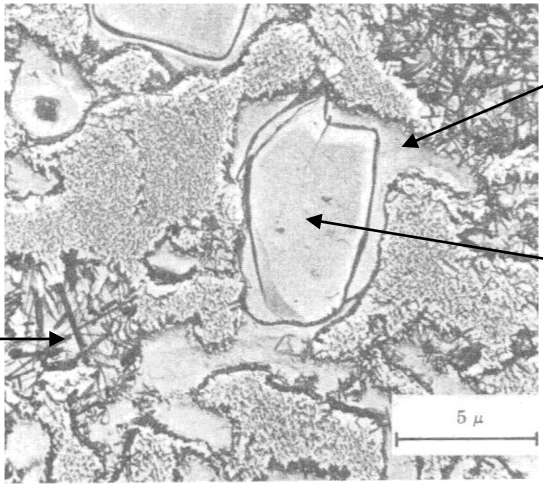
وتُعرف جمعية الخزف الأمريكية الطين " بأنه الصخر الناعم (بعد الطحن) الذي يكتسب لدونة عند الترطيب وصلادة للسطح بعد الجفاف، ويتحول إلى ما يشبه كتلة صخرية بعد الحرق " ومن الخواص العامة للخزف أنه شديدة الصلادة (Hardness) وهش، مع صلابة (Toughness) منخفضة ومطيلية قليلة جداً، كما أن المواد الخزفية لها عزل حراري وكهربي جيد، مع ثبات كيميائي عالي، ولذا فإن الخزفيات لها تطبيقات عديدة في شتى المجالات، كما أن إستخدامها يتطور سنة بعد أخرى.

1.9 أنواع الخزفيات:

1.1.9 الخزفيات التقليدية:

تتركب الخزفيات التقليدية من الطين والماء كمادة رابطة، والسليكا كمادة تسليح تزيد من صلابة الخزف، كما يضاف الفلسبار الذي يحتوي على العناصر القلوية مثل الصوديوم والباريوم والبوتاسيوم كمواد صاهرة؛ أي تساعد على صهر المواد الخام للخزف عند درجة حرارة منخفضة وتساعد كذلك على تكوين الجسم الصلد للخزف بعد الحرق، ومن أمثلة الخزفيات التقليدية الطوب الحراري والآجر وبلاط الجدران والفخريات المنزلية.

إن الخزفيات التقليدية تحتوي على العديد من الأطوار المختلفة والمتباينة، فالشكل(9-1) يبين البنية الداخلية للبورسيلين، وهي بنية غير متجانسة تحتوي على حبيبات كبيرة من الكوارتز (أكسيد السيليكون المتبلر) محاطة بسيليكات غير متبلرة شبيهة بالزجاج، كما يوجد بها طور إبري يعبر عن الفلسبار.



شكل(9−1) البنية الداخلية للبورسيلين.

مثال:

أوجد كثافة ملح كلوريد الصوديوم (NaCl)معرفة التركيب البلوري للملح ونصف قطر أيوناته، علماً بأن نصف قطر أيون الصوديوم يساوي 0.102 نانوميتر ونصف قطر أيوم الكلور يساوي 0.181 نانوميتر، والوزن الذري لهما 22.99 و 35.45 جرام لكل مول على التوالي.

الحل

حيث أن بلورة كلوريد الصوديوم هي عبارة عن بلورة مكعبة سطحية (FCC) من ذرات الكلور، أي تتواجد ذرات الكلور الكبرة الحجم على جميع الزوايا والأسطح، وتوجد ذرات الصوديوم الصغيرة الحجم بالتغلغل بين ذرات الكلور.

ويمكن حساب عدد ذرات الكلور في البلورة المكعبة السطحية كما سبق دراسته في الفصل الأول من هذا الكتاب، وذلك أن كل ذرات الزوايا تشارك بالثمن أي أنها

تساوي ذرة واحدة صحيحة، وبالمثل تشارك ذرات السطح بالنصف، أي أنها تشكل ثلاثة ذرات صحيحة، مما يجعل المجموع أربعة ذرات كاملة من الكلور في البلورة المكعبة السطحية الذرة.

وحيث أن هذا الملح كغيره من الأملاح متعادل كهربياً، أي أن عدد الشحنات السالبة لأيونات الكلور يقابلها عدد مساوي من الأيونات الموجبة لأيون الصوديوم، وبذلك فإن عدد ذرات الصوديوم تساوي عدد ذرات الكلور تساوي أربعة ذرات في البلورة الواحدة.

ويمكن حساب مجموع أوزان الذرات من عدد الذرات والوزن الذري ووزن أفوجادرو كما يأتي:

$$M = \frac{(4 \text{ x } 22.99) + (4 \text{ x } 35.45)}{6.02 \text{ x } 10^{23}} = 3.88 \text{ x } 10^{-22} \quad g$$

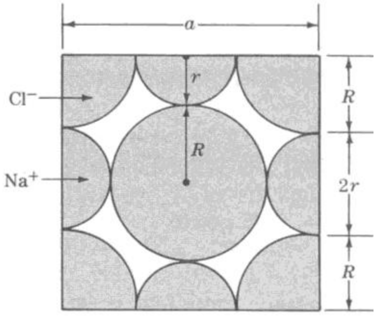
ويتم حساب حجم البلورة من أبعاد نصف قطر ذرات الكلور والصوديوم المكونة للبلورة، والشكل(9-2) يوضح توزيع أقطار الذرات على سطح واحد من البلورة، وبتكعيب أبعاد طول ضلع المكعب نتحصل على حجمه، ثم نعوض في قانون الكثافة:

$$a = 2(r \text{ Na} + R \text{ Cl})$$

$$a = 2\,(0.102 \text{ nm} + 0.181 \text{ nm}) = 0.566 \text{ nm}$$

$$V = a^3 = 1.81 \text{ x } 10^{-22} \quad Cm^3$$

$$\therefore \rho = \frac{m}{V} = \frac{3.88 \text{ x } 10^{-22} \text{ g}}{1.81 \text{ x } 10^{-22} \text{ Cm}^3} = 2.14 \quad g/Cm^3$$



شكل(9−2) مسقط رأسي لبلورة كلوريد الصوديوم.

2.1.9 الخزفيات الثقنية:

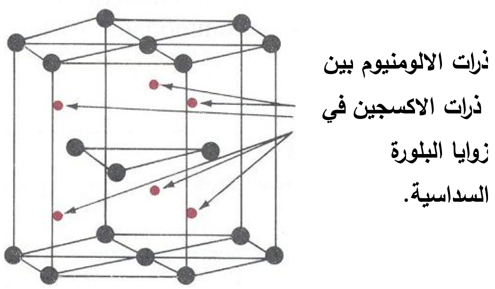
تعتبر الخزفيات الثقنية مرحلة متقدمة من الخزفيات التقليدية، ويعتمد تصنيعها على إستعمال مواد نقية بدلاً من الطين مثل أكسيد الالومنيوم أو الزركونيوم أو الماغنيسيوم وكذلك كربيدات السليكون أو الزركونيوم وغيرها والجدول (9 .2) يبين خواص كل منها. وتستخدم هذه المواد في المجالات الثقنية مثل العوازل الحرارية ورشاشات المحركات وأوراق ودواليب التجليخ والصنفرة وكذلك العوازل الكهربية وغيرها.

جدول(9 .2) بعض المركبات الخزفية النقية ودرجة إنصهارها.

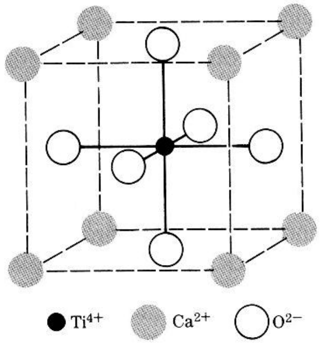
المركب	(دم)	المركب	(دم)
كربيد الهافانيوم(HfC)	4150	كربيد البورون(B_4C)	2450
كربيد التيتانيوم(TiC)	3120	أكسيد الالومنيوم(Al_2O_3)	2050
كربيد التنجستون(WC)	2850	أكسيد السليكون(SiO_2)	1715
أكسيد الماغنيسيوم(MgO)	2798	نيتريد السليكون(Si_3N_4)	1900
كربيد السليكون(SiC)	2500	أكسيد التيتانيوم(TiO_2)	1605

2.9 البنية البلورية للمواد الخزفية:

يختلف البناء البلوري للخزفيات من مركب إلى آخر، فمنها ما هو بسيط مثل أكسيد الالومنيوم الذي يتكون من بلورة سداسية (HCP) تتواجد ذرات الاكسجين عند زوايا البلورة ووسطها، وتدخل ذرات الالومنيوم بالتغلغل بحيث تحتل تلثي حجم البلورة فقط كما بالشكل(9–3)، وبالمثل فإن بلورة تيتانات الكالسيوم تتواجد ذرات الكالسيوم عند زوايا البلورة المكعبة وتتوزع ذرات الاكسجين على السطح وتحتل ذرة التيتانيوم وسط البلورة كما بالشكل **(9–4)**.

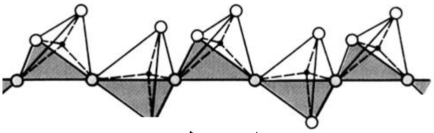


شكل(9–3) بلورة أكسيد الالومنيوم.

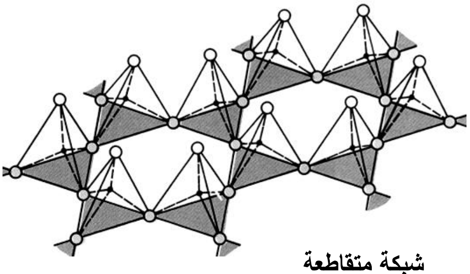


شكل(9–4) بلورة مكعبة من تيتانيت الكالسيوم

من ناحية أخرى فإن الكثير من المواد الخزفية لها ترتيب بلوري معقد، فمثلا أكسيد السليكون الذي يعتبر أساساً للكثير من المنتوجات الخزفية يكون في الحالة العادية على شكل بلورات رباعية ويمكن لذرات الاكسجين الأربعة أن ترتبط مع عناصر أخرى مثل الالومنيوم أو البوتاسيوم أو الكالسيوم أو ذرات سليكون أخرى، وبذلك تتكون سلاسل طويلة ومتنوعة كما بالشكل**(9–5)**.



بوليمر خطي



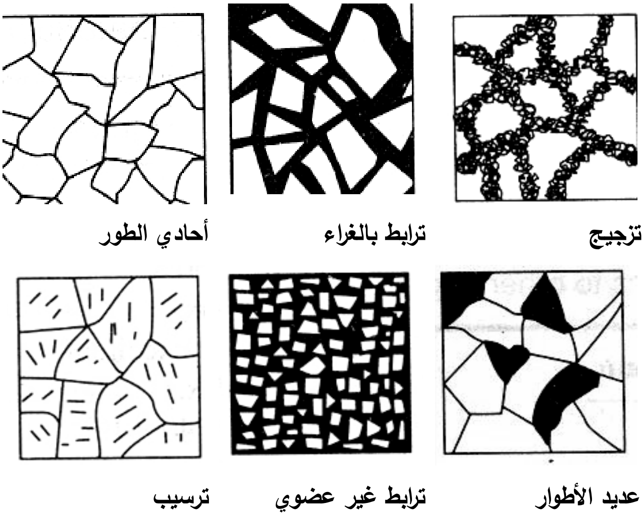
شبكة متقاطعة

شكل(9–5) سلسلة من أكسيد السليكون الرباعي (SiO_4^{4-})
والسلسلة في حالة تقاطع لتعطي شبكة من البلورات الرباعية.

3.9 التركيب المجهري:

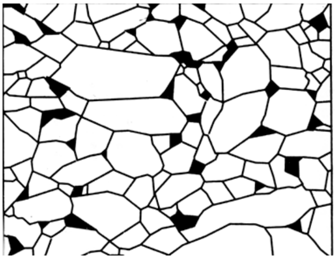
حيث أن معظم المواد الخزفية تحتوي على أكثر من طور بسبب تعدد المواد الداخلة في التصنيع فإن التأثير على الخواص وخاصة الميكانيكية منها يتطلب التحكم في التركيب المجهري، وكمثال على ذلك أن حجم الحبيبات (grain size) الصغيرة والمتجانسة تعطي قوة شد أكبر من الحبيبات الكبيرة، وهذا مناظراً لما يحدث في المعادن.

والجدير بالذكر أنه هناك العديد من التركيبات المجهرية للمواد الخزفية التي تعتمد على المكونات كما بالشكل(9–6). وبالمقابل فإن بعض الخزفيات غير متبلرة أو لها مكونات شفافة مثل الزجاج أو أحادية البلورة، الأمر الذي لا يعطي شكل معين لمكوناتها الداخلية.



شكل(9–6) البنية الداخلية لبعض الخزافيات.

وبما أن الخزفيات يتم تجهيزها بعملية الحرق فإنها لا تخلوا من وجود فجوات وفراغات داخلية بين الحبيبات كما هو مبين في الشكل(9–7)، وهذه الفراغات والمسامات تقلل كثيراً من قوة الخزف.



شكل(9–7) الفراغات في بنية أكسيد الألومنيوم .

4.9 عمليات التصنيع:

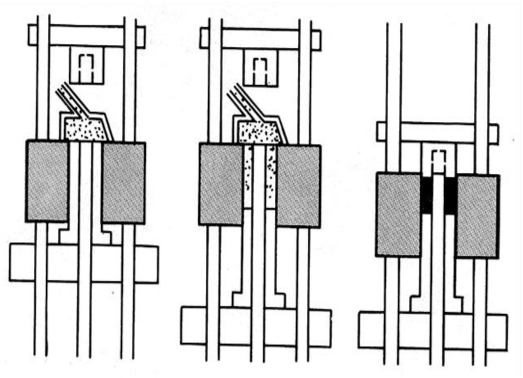
تشترك الخزفيات التقليدية والتقنية في أن العمليات الأساسية تعتمد على تجهيز الخامات التي تتضمن الغربلة والطحن ثم الترطيب والتشكيل وأخيراً الحرق.

وتختلف من ناحية تفاصيل هذه العمليات، ففي حالة صناعة طوب البناء والطوب الحراري يكون الطحن والغربلة قليلا، ولا تفصل الشوائب غير العضوية ويكون الترطيب بإستعمال الماء، في حين أن صناعة الخزفيات الثقنية تتطلب مواد خام عالية النقاوة وقد تضاف مواد رابطة عضوية ومواد تمنع الالتصاق بالقالب ويعتمد ذلك علي نوعية المنتوج وطريقة التصنيع.وتتشابه بعض طرق تشكيل الخزف مع الطرق المتداولة في صناعة المواد البلاستيكية والمعدنية.

1. طريقة الكبس الجاف (Dry pressing):

تعتبر طريقة الكبس من الطرق الأساسية في صناعة الخزفيات الثقنية، وتستخدم عادة لإنتاج الخزفيات المستعملة عند درجات الحارة العالية والمواد العازلة للحرارة . ويتم التشكيل بتعريض شحنة المواد الخام وما تحتويه من ماء أو مواد رابطة وإضافات لقوة ضغط بداخل مكبس، بحيث تترابط المحتويات لتكوين شكل القالب، ويتم نزع الشغلة من المكبس وإعادة كبس شحنة أخرى وهكذا دواليك، وبعد ذلك يتم الحرق عند درجات الحرارة العالية.

وتمتاز هذه الطريقة بسرعتها الكبيرة وإمكانية الحصول على أشكال مختلفة بتغيير نوع القالب مع دقة عالية للأبعاد، والشكل (9-8) يبين خطوات تصنيع الخزف بطريقة الكبس الجاف.

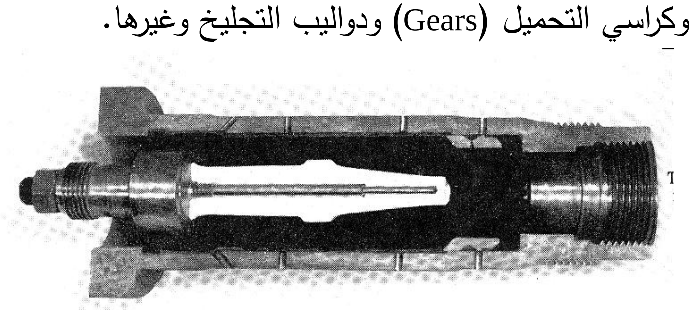


شكل (9–8) خطوات تصنيع الخزف بطريقة الكبس الجاف.

2. الكبس (Isostatic pressing):

تعتمد هذه الطريقة على وضع المواد الخام في كيس مطاطي مرن يغلق باحكام ثم يوضع في القالب ويتم تعريضه لضغط عالي بإستعمال ضاغط هيدروليكي وبذلك تتداخل مكوناته وتتصلب لتكوين المنتوج المطلوب كما بالشكل(9–9). وتحرق المنتوجات بعد تشكيلها أو يستخدم التشكيل والحرارة في آن واحد بدلا من الحرق، وتستخدم الطريقة الأخيرة لتحسين الخواص الميكانيكية للمنتوج.

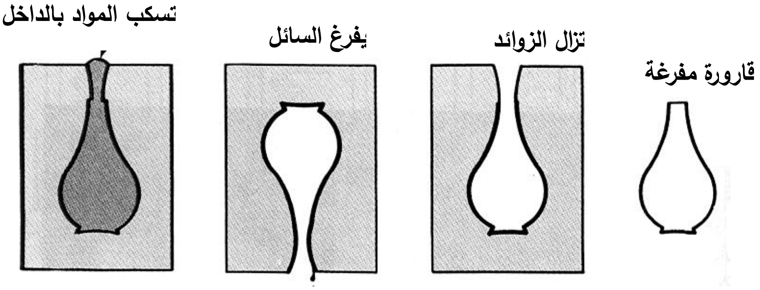
وهناك العديد من المنتوجات التي تصنع بهذه الطريقة مثل شمعات الاحتراق للمحركات وكراسي التحميل (Gears) ودواليب التجليخ وغيرها.



شكل (9–9) قطاع طولي لقالب يستعمل لصناعة شمعات الاحتراق بطريقة الكبس.

3. السباكة السائلة (Slip Casting):

تعتبر السباكة السائلة فريدة من نوعها لصناعة الخزفيات المفرغة، ورغم أنها غير ذات أهمية كبيرة في الصناعات الهندسية الخزفية إلا أنها جديرة بالذكر لسهولة إستعمالها وإنخفاض تكلفتها، ففي هذه الحالة يتم خلط وترطيب مواد الخام الخزفية على شكل سائل ثم تسكب في قالب مسامي مصنوع من الجبس، وبعد برهة من الزمن يمتص القالب جزء من الطين ويتصلب بحيث تتكون طبقة متماسكة على سطح القالب، عندها يسكب الطين السائل المتبقي ليترك فراغا بداخله كما بالشكل(9−10).



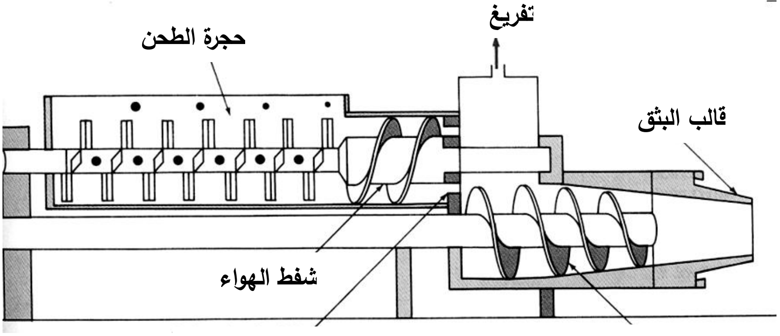
شكل (9−10) صناعة القوارير المفرغة بطريقة السباكة السائلة.

4. البثق (Extrusion):

لم يقتصر إستعمال طريقة البثق في تشكيل معدن الالومنيوم والمواد البلاستيكية بل وجدت لها تطبيقات واسعة في مجال صناعة المواد الخزفية وذلك لكفاءتها العالية وسرعة إنتاجها ودقة أبعاد منتوجاتها. وهناك طريقتان لبثق الخزفيات

وهما: طريقة البثق مع التفريغ الهوائي، ويستعمل لذلك ألة مزودة بمحور للطحن ومحور آخر للترطيب والحقن إلى القالب كما بالشكل(**9–11**). وقد يكون الحقن مستمراً أو دورياً وذلك حسب نوع المنتوج كما يمكن تغيير القالب للحصول على منتوجات متنوعة، وهذه القوالب عادة ما تكون مفتوحة من الناحية الخارجية وتستخدم هذه الطريقة في صناعة الطوب والانابيب والبلاط وكذلك بعض العوازل الكهربائية وغيرها.

والطريقة الأخرى تعتمد على إستخدام ضغط كبير بواسطة مكبس على شحنة المواد الخام الموضوعة في قالب مقفل، الأمر الذي يعطي منتوجات ذات دقة عالية في الأبعاد وخلوه من المسامات والعيوب الداخلية.



شكل (9–11) صناعة الخزف بطريقة البثق.

5. دولاب الخزاف:

يستعمل دولاب الخزاف اليدوي أو الالي في الكثير من الدول لصناعة الفخاريات منذ قرون عديدة، ويعتمد التشكيل على براعة الخزاف، حيث يمكن به صناعة الأواني المسطحة مثل الصحون والمفرغة مثل الاباريق والجرار وغيرها، ويتم

ذلك بترطيب الطين والسليكا وعجنها لتصبح ذات قوام، ثم يقوم الخزاف بتدوير حجم مناسب منها على قاعدة متصلة بدولاب يدار بالرجل أو اليا بإستخدام محرك كهربائي ذو سرعة منخفضة، ويتم تشكيل الطين يدويا إلى أشكال متعددة.

وخلاصة القول أن طرق تشكيل المواد الخزفية كثيرة ومتنوعة، وما ذكر منها سوى الطرق الأكثر إستعمالاً، وهناك أساليب أخرى للتشكيل مثل التشكيل الهولامي (sol-gel) ويعني ذلك تفاعل مادتين لتكوين مادة هلامية (شبه سائلة) تصب في قوالب ثم تحرق لتكوين مواد خزفية، ومن الطرق المهمة لصناعة الكربيدات تسخين السليكا مع الكربون لمدة طويلة ثم تطحن وترش أوتعجن بمواد لاصقة لصناعة أوراق الصنفرة ودواليب التجليخ.

شكل(9−12) دولاب الخزاف.

5.9 المعالجة الحرارية:

تعتبر المعالجة الحرارية ضرورية عند صناعة المنتوجات الخزفية، وهي الوسيلة الأساسية لخلق ترابط بين المكونات. وتتضمن المعالجة الحرارية عمليات التجفيف والحرق والتزجييج.

1. التجفيف (Drying):

إن الغرض من التجفيف هو التخلص الجزئي من الماء أو مادة الترطيب من الخزف بعد التشكيل وقبل الحرق، ويتم ذلك عند درجة الحرارة العادية وبزمن يزيد عن 24 ساعة معتمداً على حرارة الجو ورطوبته، أو في أفران عند درجة حرارة تقارب 100 دم في حالة الترطيب بالماء، وتزيد عن ذلك في حالات الترطيب بالمواد الهيدروكربونية.

والجدير بالذكر أن التشطيب النهائي لأبعاد المنتوجات عادة ما يتم عند هذه المرحلة أي قبل الحرق، وذلك أن الخزف يكون بعد التجفيف قد إكتسب بعض التماسك الذي يؤهله لعمليات الثقب والقلودة أو إزالة بعض الاجزاء منه، ويتم ذلك بإستعمال ألآت مشابهة للالات المستعملة في تشكيل المعادن مثل الآت الخراطة والمقاشط، وبسبب الصلادة العالية للخزف فإن أقلام القطع عادة ما تكون من النوعيات الجيدة مثل أقلام الماس أو الكربيدات العالية الصلادة.

2. الحرق (Sintering):

عند القيام بعملية الحرق تترابط المواد الداخلة في الخزف مع بعضها البعض نتيجة للإنصهار الجزئي لمكوناتها ويتم ذلك عن طريق إنتشار المواد الصلبة (Solid State Diffusion)، وينتج عن الحرق تحول الخزف المجفف من مادة مسامية هشة إلى مادة شديدة الترابط وذات كثافة عالية.

وتتلخص ميكانيكية الحرق في رفع حرارة الخزف إلى درجة كفيلة بانتشار (بداية الإنصهار) ذرات مكوناتها مما يؤدي إلى تكوين روابط كيميائية بين أجزائها .وتعتمد درجة حرارة الحرق على درجة إنصهار المكونات، فمثلا درجة إنصهار أكسيد الالومنيوم يساوي 2050 دم وعند تصنيع مواد خزفية من الالومينا يتم حرقها عند

درجة حرارة تقارب 1600 دم أي أقل من درجة الإنصهار وهكذا بالنسبة لمواد الخزف الأخرى.

ومن الملاحظ أن حرق المادة الرابطة (خاصة عند إستعمال المواد الهيدروكربونية) كثيراً ما تقلل من قوة وكثافة الخزف بسبب تكوين مسامات وفراغات بداخله، كما أن عملية الحرق تؤدي إلى إنكماش أحجام المنتوجات ولذا يتحتم إتباع سماحية معينة لتعويض النقص في الأبعاد.

3. التزجيج (Vitrification):

تحتوي بعض مواد الخام الخزفية على طور زجاجي الذي يتصف عادة بأنه له درجة إنصهار منخفضة، وهذا الطور يعمل كوسط ناقل لانتشار الايونات عند درجة حرارة أقل من درجة حرارة الحرق، وبذلك فإن هذا الطور الزجاجي السائل يقوم بغلق المسامات كما يتفاعل مع المواد التي لم تتصهر ويغلفها، وعندما يبرد الخزف يكون قد اكتسب سطحا زجاجيا لامعاً ذو صلادة عالية.

6.9 الخواص الميكانيكية للخزفيات:

1. مقاومة الشد:

تعتبر الخزفيات مواد هشة قابلة للكسر وذات قوة شد ضعيفة وصلادة عالية، إلا أن العديد من الخزفيات الثقنية لها خواص ميكانيكية جيدة، ففي حين أن الخزفيات التقليدية لا يتجاوز مقاومتها للشد 172 ميجاباسكال، فإن الخزف المصنع من أكسيد الالومنيوم تتجاوز مقاومته للشده 7000 ميجاباسكال، هذا بالاضافة إلى أن معظم الخزفيات لها مقاومة جيدة للضغط والتي تتجاوز 5 إلى 10 أضعاف مقاومتها للشد.

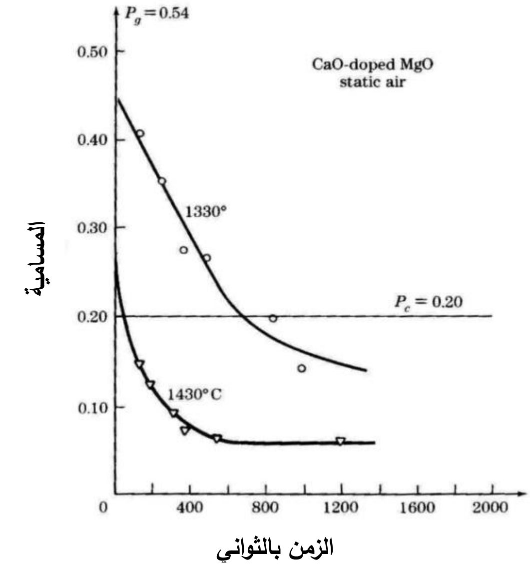
إن قياس قوة الشد بالطريقة التقليدية المستعملة في السبائك المعدنية غير شائعة بل غير ممكنة أو مكلفة في معظم الاحيان، بسبب صعوبة تجهيز الابعاد القياسية للعينة الخزفية، وصعوبة ربطها على الالة، ولذلك يستعمل بديلاً عنها يعرف بالتحميل الرباعي (Four point flexural strength) وذلك حسب المواصفة العسكرية الامريكية (MIL-STD-1942)، حيث يوضع القضيب الخزفي بابعاد مم 3 50 x 5x على حافتي دعامتين ويتم تحميل العينة عند نقتطين على أبعاد متساوية من منتصف العينة حتى حدوث الانهيار وعندها يتم قياس قوة الشد عند الكسر وإجهاد الشد. والجدول(9–3) يبين بعض الخواص الميكانيكية للخزفيات التقنية.

الجدول(3.9) بعض الخواص الميكانيكية للخزفيات الثقتية.

المادة	الكثافة (g/cm^3)	مقاومة الشد (MPa)	مقاومة الضغط (MPa)	الصلابة $(MPa\sqrt{m})$
أكسيد الالومنيوم (Al_2O_3) نقي	3.85	207	2585	4
نيتريد السليكون (Si_3N_4) تشكيل بالضغط	3.19	-	3450	6.6
كربيد السليكون (SiC) بعد الحرق	3.1	170	3860	4
كربيد الزركونيوم + أكسيد الماغنيسيوم (ZrO2+9% MgO) حرق جزئي	5.5	-	1860	8+

وحيث أن الخزفيات هشة فليس لها نقطة خضوع أو لدونة (deformation Plastic) أي أنها تنهار عند إنتهاء منطقة المرونة أي أنها ليس لها إستطالة أو نقص فى المساحة، ولايحدث لها ليونة بالتسخين، وهذه الخواص تحد من تشكيلها بالطرق المستعملة في المعادن مثل السحب والدرفلة.

ويلاحظ أن زيادة حرارة التزجيج تقلل كثيراً من مسامية المادة الخزفية، وذلك عن طريق صهر بعض مكونات الخزف وإندماجها مع المواد الأخرى لسد المسامات، والشكل(9−13) يوضح تأثير إرتفاع درجة حرارة التزجيج على أكسيد الماغنيسيوم المحتوي على 0.2 % بالوزن أكسيد الكالسيوم.



شكل(9−13) تأثير الحرارة والزمن على مسامية أكسيد الماغنيسيوم المحتوي على 0.2 % أكسيد الكالسيوم.

2. الصلابة:

حيث أن الخزفيات لها روابط أيونية وتساهمية فإن صلابتها ضعيفة، وذلك نتيجة لانخفاض مقاومة الشد وعدم وجود مطولية (أي أنها مواد هشة قابلة للكسر ولا تتحمل الصدمات الفجائية) . ولقد تم إيجاد بعض الخزفيات التقنية التي لها صلابة

أعلى من الخزفيات التقليدية كما بالجدول (3.9) ، ويتم قياس الصلابة للمواد الخزفية بإستعمال عينات ذات تحميل رباعي كما في إختبار الشد، مع وجود حز أسفل العينة كما بالشكل(9−14)، ويتم التعويض في معادلة صلابة الكسر(9−1)

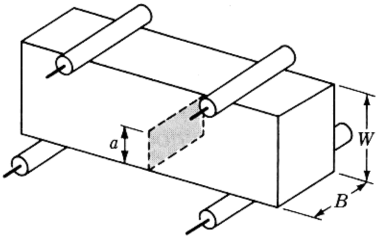
$$KIC = Y\sigma_f \sqrt{\pi a} \qquad (1-9)$$

حيث: KIC :صلابة الكسر ($MPa.m^{0.5}$).

: σ_fالاجهاد عند الكسر (MPa).

a : نصف عمق الشق بالعينة (m).

Y : معامل يعتمد على المادة يقارب الواحد الصحيح.



الشكل(9−14) توزيع الاحمال عند قياس الصلابة.

ولقد أمكن الحصول على صلابة عالية لبعض الخزفيات مثل أكسيد الزركونيوم عند إضافة 9 مول % أكسيد الماغنيسيوم، حيث يعمل الماغنيسيوم على ثبات البلورة المكعبة للزركونيوم عند درجة الحرارة العادية (في حين أن تواجدها في الحالة النقية تكون عند درجة حرارة أكبر من 2370 دم وهذا يشابه إضافة النيكل إلى الصلب للحصول على الاوستينيت. كما يمكن الحصول على صلابة عالية لأكسيد الزركونيوم باضافة أكاسيد أخرى مثل أكسيد الكالسيوم أو اليوتيريوم.

وتتفق معظم الدراسات في هذا المجال على أن العيوب السطحية والداخلية عند التصنيع تعتبر المصدر الأساسي لإنهيار المنتوجات الخزفية عند تحميلها بقوة خارجية، فالتشققات والمسامية والكسور الناتجة عن الانكماش أو خروج الغازات بسبب الحرق تعتبر اماكن تتركز عندها الاجهادات، وحيث أن الخزفيات ليس لها مطولية فإن مرحلة تقدم الكسر تكون قصيرة، يحدث بعدها إنهيار فجائي، وهذه الظروف تفسر مقاومة الشد والصلابة الضعيفة للمواد الخزفية عامة.

3. مقاومة الكلال والتزحف:

يحدث الكلال في المعادن بسبب إجهاد الشد الدوري، وينتج عنه كسر بعد عدد كبير من الدورات. يبداء نشؤ الكسر عند نقطة معينة (عادة على السطح) ثم ينمو إلى الداخل حتى نقطة الانهيار. وحيث أن المواد الخزفية لها مقاومة شد ضعيفة ومقاومة ضغط عالية فإنها ليس لها مقاومة لكلال الشد في حين أنها تتحمل إجهاد الضغط.

أما التزحف فإن مقاومة الخزفيات لدرجات الحرارة العالية لايزيدها مقاومة للتزحف، وذلك بسبب إنخفاض المقاومة للشد المرافقة للحرارة. ولذا فإن تصميم التحميل للمواد الخزفية يجب أن يعتمد على إجهاد الضغط وليس إجهاد الشد في حالتي الكلال والتزحف، أي أن التحميل يكون ضاغطاً بمقادير مختلفة ولا يوجد به شد.

7.9 الخواص الفيزيائية:

تتصف الخزفيات بدرجة إنصهار مرتفعة مما يكسبها مقاومة جيدة لدرجات الحرارة العالية، ولذا تستعمل في صناعة الطوب الحراري وبواثق صهر المعادن وغيرها، كما أن توصيلها الحراري والكهربي ضعيف بسبب الرابطة الأيونية

والتساهمية، مما يجعلها مناسبة لصناعة العوازل الكهربية والحرارية، وتمتاز هذه العوازل عن مثيلاتها البلاستيكية بأنها يمكن إستعمالها عند درجات عالية تتجاوز 200 دم، ويستثنى من ذلك بعض الخزفيات التى تشتغل كأشباه الموصلات، فمثلا تزيد توصيلية كربيد السليكون بازدياد درجات الحرارة، وهذا يؤكد على أهمية مراجعة الخواص الكهربية للخزفيات كل على حدة.

وأخيرًا فإن الكثير من المواد الخزفية مثل كربيد البورون وكربيد السليكون لها كثافة اقل بكثير من المواد المعدنية وذلك بسبب المسامية الكبيرة، وهذا يجعلها مناسبة لبعض التطبيقات الهندسية الخاصة.

8.9 الخواص الكهربية للخزفيات:

تستعمل المواد الخزفية كثيراً كعوازل للتيار الكهربي، وفي صناعة المكثفات ولها تطبيقات أخرى خاصة مثل تحويل النبضات الميكانيكية الضعيفة إلى إشارات كهربية والعكس بالعكس، وهناك ثلاثة خواص فيزيائية تحدد مدى جودة العوازل الخزفية:

1. ثابت العزل الكهربي (Dielectric Constant)

يحدد ثابت العزل الكهربي مدى مقدرة المادة على عزل إنتقال الشحنات الكهربية من نقطة إلى أخرى، ويجدر بنا مراجعة سريعة لقانون إنتقال الشحنات في المكثفات لتوضيح خواص العوازل الخزفية.

عند وجود لوحين معدنيين متقابلين موصلان بفرق جهد خارجي كما بالشكل(9−15) ، يعمل اللوحين في هذه الحالة كمكثف تتواجد الشحنات الموجبة على

إحداهما وتتواجد الشحنات الموجبة على الأخر، ويمكن حساب شحنة المكثف أو سعته من المعادلة (9−2)

$$q = C \times V \qquad (2-9)$$

$$\therefore \quad C = \frac{q}{V} \qquad \because \quad 1farad = \frac{1oulomb}{Volt}$$

q : مقدار الشحنة بالكولوم.

V : فرق الجهد بالفولت.

C : السعة بالفاراد .

ومن المعروف أن سعة المكثف هي عبارة عن مقدرة المادة على تخزين الشحنة الكهربية، فكلما كان تخزين الشحنات كبيراً بين قطبي المكثف كلما كانت السعة كبيرة، وعندما لا توجد مادة بين قطبي المكثف (أي وسط به هواء فقط) تحسب السعة من المعادلة (9−3).

$$C = \frac{\varepsilon_{\circ} A}{d} \qquad (3-9)$$

حيث أن:

C : السعة.

d : المسافة بين القطبين.

$\varepsilon_{\circ}$: معامل السماحية للهواء.

أما في حالة وجود مادة عازلة مثل المواد الخزفية، فإن المعادلة السابقة يلحق بها معامل آخر (k) وهو ثابت العزل الكهربي للمادة، والسعة تصبح سعة المادة، ويتم حساب السعة من المعادلة(9−4).

$$C = \frac{\kappa \ \varepsilon_{\circ} \ A}{d} \qquad (4-9)$$

وبـذلك فـإن تخـزين الشـحنات فـي هـذه المـادة يكـون كبيـراً، ويزيـد كثيـراً فـي سـعة المكثف، كما أن إختيـار مـواد ذات ثابـت عـزل كهربـي يجعـل تصـنيع مكثفـات صـغيرة الحجم وذات سعة كبيرة ممكناً، وهذا ما تطلبه الأجهزة الكهربية والإليكترونيـة المحمولـة والحديثة في مختلف المجالات، والجدول(9–4) يوضح ثوابت العزل الكهربي لبعض المواد.

2. شدة العزل الكهربي (Dielectric Strength):

شدة العزل الكهربي عبارة عن قابلية المادة للمحافظة على الشحنة أو الطاقة عند تعرض قطبي المكثف لفرق جهد عالي، ولذلك يعبر عنه بوحدة جهد لكل وحدة مسافة، ويلاحظ أن لكل مادة حد معين من فرق الجهد يمكن أن تتحمله ثم تتسرب الشحنة من قطب إلى القطب الآخر وينهار العزل الكهربي للمادة، والجدول(9–4) يوضح شدة العزل الكهربي لبعض المواد الخزفية.

3. معامل الفقد (Dielectric loss factor) :

عند مرور تيار كهربي متردد في موصل يكون التيار متقدما عن الجهد بزاوية 90 درجة، وهذا صحيح عند وجود مادة ذات معامل فقد صفري بين قطبي مكثف، إلا أنه عملياً تؤثر جميع العوازل في الزاوية بين التيار والجهد وتنقص منها مما يسبب فقد في الشحنة والتي تتحول إلى طاقة حرارية، وهذا يقلل من كفاءة المكثفات، والجدول(9–4) يوضح معامل الفقد لبعض المواد.

جدول(9–4) ثوابث العزل الكهربي ومعامل الفقد لبعض العوازل الهندسية.

المادة	ثابت العزل الكهربي (ميجاهيرتز)	شدة العزل الكهربي (ميجاهيرتز)	معامل الفقد (ميجاهيرتز)
البورسيلين		-212	0.007-0.025
فوستيريت	6	9.8	0.001-0.002
ألومينا	9	9.8	0.008-0.009
زجاج الجير والصوداء	7.2		0.009
سليكات منصهرة	3.8		0.00004

9.9 الخواص الكيميائية:

حيث أن الخزفيات تتكون من مواد طبيعية لها ثبات كيميائي كبير مثل أكاسيد المعادن والكربيدات فإنها أقل نشاطاً وأقل تفاعلاً مع البيئة المحيطة. فالمواد الخزفية لا تتفاعل مع معظم الاحماض والقلويات والمذيبات العضوية ما عدا حمض الهيدروفلوريك (HF) الذي يعمل على إذابة السليكا المتواجدة في الخزف أو الزجاج.

إن الاستقرار الكيميائي للمواد الخزفية يجعلها غير قابلة للمعالجة الحرارية أي لا تتغير مكونات أو بنية الخزف بالتسخين أو التبريد، ويكون التاثير الوحيد هو باضافة مواد معينة عند التصنيع وقبل الحرق.

10.9 الخزفيات الثقنية:

مقارنة بالخزفيات التقليدية مثل الفخاريات التي تصنع من الطين فإن الخزفيات الثقنية تعتمد في تصنيعها على مواد نقية تتمثل في أكاسيد وكربيدات المعادن مثل أكسيد الالومنيوم أو أكسيد الزركونيوم أو كربيد السليكون، وهذه المواد لها درجة إنصهار عالية وإستقرار كيميائي كبير كما هو موضح بالجدول(9–2).

1. أكسيد الالومنيوم (Al_2O_3):

يستخلص أكسيد الالومنيوم من البوكسيت ($Al_2O_3.2H_2O$) بعد تنقيته جيداً، ويستعمل في العديد من الاغراض التقنية مثل بواتق الصهر للمعادن والعوازل، كما يمكن إضافة أكسيد الماغنيسيوم إليه للحصول على بنية مجهرية خالية من العيوب والفراغات مع مقاومة جيدة للحك وللمواد الكيميائية، وهذا جعلها ذات أهمية في صناعة العوازل عند الحرارة العالية مثل عوازل الشمعات لمحركات الاحتراق الداخلي ورشاشات محركات الصواريخ وريشات المضخات وغيرها من التطبيقات الهندسية المختلفة.

2. كربيد السليكون(Silicon Carbide):

يتم تصنيع كربيد السليكون بعدة طرق إلا أن الطريقة الأكثر إستعمالاً تلك التي يتم فيها حرق فحم الكوك مع الرمل (أكسيد السيليكون) و 0.5 إلى 1% بورون لفترة طويلة قد تصل إلى 72 ساعة أو أكثر عند درجة حرارة تقارب 2100 دم بحيث تنتشر ذرات الكربون الصغيرة الحجم بداخل السليكا وتتفاعل معها لتكوين كربيد السليكون ويحترق الاكسجين، ويمكن بهذه الطريقة إنتاج النوعين السداسي (α) أو المكعب(β).

ويمتاز كربيد السليكون بأنه ذو صلادة عالية ومقاومة جيدة للتاكسد والاحتكاك عند درجات الحرارة العالية، ولذلك يستخدم في صناعة دواليب وأوراق الكشط والتجليخ والصنفرة وكذلك كألياف صناعية في المواد المركبة.

3. نيتريد السليكون (Silicon Nitride):

يعتبر نيتريد السليكون من الخزفيات التقنية التي أستخدمت مع نهاية الثمانينات وبداية التسعينات من القرن الماضي، ويتم تصنيعها بطريقتين احداهما عن طريق تفاعل مسحوق السليكون مع غاز النيتروجين ثم الحرق، وهذه تعطي خزفيات ذات مسامات وفراغات داخلية مع إنخفاض في الكثافة وهذه الفراغات كثيراً ما تعطي خواص ميكانيكية ضعيفة، والطريقة الأخرى تلك التي تعتمد على كبس نيتريد السليكون مع 1–5% أكسيد الالومنيوم في آن واحد، وهذا يعمل على تكوين خزفيات ذات صلادة وكثافة عالية وخالية من العيوب الداخلية.

وتتسم هذه الخزفيات بالخواص الآتية:

1. المحافظة على قوة وصلادة المادة الخزفية عند درجات الحرارة العالية حتى 1000 دم.
2. مقاومة جيدة للتغير الفجائي في درجات الحرارة (resistance Thermal shock).
3. كثافة منخفضة.
4. تمدد حراري قليل.
5. صلابة افضل من أكسيد الالومنيوم والكربيدات الأخرى.

ويستخدم نيتريد السليكون في صناعة اقلام القطع للالات وقطع غيار التربينات الغازية ومحركات الديزل وقوالب البثق وكذلك قطع غيار المضخات المقاومة للحك (Wear) والمواد الكيميائية.

4 .أكسيد الزركونيوم المحسن (Stabilized Zirconia):

تحتوي البنية البلورية لأكسيد الزركونيوم على بلورات احادية الميل عند درجة الحرارة العادية وتتحول هذه إلى البلورة الرباعية بعد 1170 دم وحتى 2370 دم ثم

البلورة المكعبة بعد ذلك. وهذا التغير في البلورة إذا سمح له أن يحدث فإن الشغلة المصنعة من أكسيد الزركونيوم النقي ستتهار عند الحرارة العالية، ولذلك ثم إضافة مركبات أخرى مثل 9 % أكسيد الماغنيسيوم أو مركبات اليوتيريوم أو الكالسيوم لتعمل على تثبيت وجود البلورة المكعبة عند درجة الحرارة العادية، وبذلك يمكن تحسين الخواص الميكانيكية للزركونيا والتي تتلخص فيما ياتي:

1. عزل حراري جيد.
2. صلابة ومقاومة للشد أفضل من معظم الخزفيات الثقنية الأخرى.
3. تمدد حراري مساوي لتمدد الصلب وهذا يجعله مناسبا لعمل طلاء أو كساء فاصل للحرارة (Thermal Barrier Coating) لمعظم أنواع الصلب دون حدوث تشقق عند درجات الحرارة العالية.
4. صلادة أقل من الخزفيات الأخرى.

وتستعمل الزركونيا المحسنة في العديد من المجالات أهمها صناعة الكساء الفاصل للحرارة بطريقة الرش بإستعمال البلازما أو المواقد العالية الحرارة وذلك للحصول على أسطح تقاوم درجات الحرارة العالية.

أسئلة الفصل التاسع

1. ما هي الخواص العامة للخزفيات.
2. قارن بين الخزفيات التقليدية والخزفيات التقنية.
3. وضح بالرسم أنواع سلاسل أكسيد السليكون.
4. ما هي المكونات الأساسية للخزفيات التقليدية.
5. أوجد كثافة كبريتيد الخارصين (ZnS) بفرض أن نصف قطر أيونات الكبريت تساوي 0.06 نانوميتر وأن طول ضلع بلورة كبريتيد الخارصين المكعبة يساوي 0.54 نانوميتر، وتحتوي البلورة على ما يساوي 4 ذرات خارصين و 4 ذرات كبريت.

(M.wt: Zn^{2+} = 65.37 g/mol, S^{2-} = 32.06 g/mol)

6. أذكر خطوات ومزايا تصنيع الخزفيات بطريقة الكبس الجاف.
7. بين بإيجاز الخطوات الرئيسية لمعالجة الخزفيات.
8. ما هو الهدف من تجفيف المادة الخزفية قبل حرقها.
9. ما هو دور الطين والسليكا في صناعة الخزفيات التقليدية.
10. ما تأثير الحرق والترجيج على المادة الخزفية.
11. مما تتكون الخزفيات التقنية.
12. أذكر بعض الأمثلة لمواد الخام المستخدمة في صناعة الخزفيات التقنية.
13. ما هي الإستعمالات الآساسية للخزفيات التقنية.
14. ما هي علاقة العزل الكهربي بمقدار السعة الكهربية للمادة.
15. عرف شدة العزل الكهربي للمادة.
16. مكثف يتكون من صفيحتين متقابلتين بمساحة قدرها 0.5 ميكرو ميتر مربع ولهما القدرة على تخزين شحنة قدرها $7x10^{-5}$ كولوم عند جهد قدره 12000

فولت. إذا وضعت مادة تيتانات الباريوم ذات ثابت عزل كهربي (k) يساوي 2100 بين الصفيحتين. أوجد المسافة بين الصفيحتين.

17. أرسم البنية الداخلية للبورسيلين، مع ذكر المكونات الأساسية لهذه المادة الخزفية.

18. قارن بين الخواص الكهربية للبورسيلين وعوازل الألومينا.

19. وضح لماذا يعتبر الفوستيريت من العوازل العالية الجودة.

20. ما هي العيوب الأساسية في البنية الداخلية للمواد الخزفية.

21. ما تأثير المسامية وحجم الحبيبات على مقاومة الشد للمواد الخزفية.

22. عينة من نيتريد السليكون لها مقاومة إجهاد قدرها 290 ميجاباسكال، ومعامل الصلابة (معامل شدة الإجهاد) يساوي 4 ميجاباسكال. أوجد أقصى حد لكسر داخلي قبل إنهيار المادة الخزفية، علماً بأن ثابت معادلة شدة الإجهاد يساوي الواحد الصحيح.

23. عند قياس معامل شدة الإجهاد الحرج (KIC) لأكسيد الزركونيوم عديد التبلر وجد أنه يساوي 5.2 ميجاباسكال م$^{0.5}$:

أ) إذا كان إجهاد الكسر يساوي 450 ميجاباسكال، أوجد أقصى قيمة للكسر السطحي ($Y=\sqrt{\pi}$).

ب) إذا تم معالجة الزركونيا ليصل معامل شدة الإجهاد الحرج إلى 12 ميجاباسكال م$^{0.5}$ وكان الكسر السطحي مساويا للحالة الأولى، أوجد أقصى قيمة للإجهاد لحدوث الكسر.

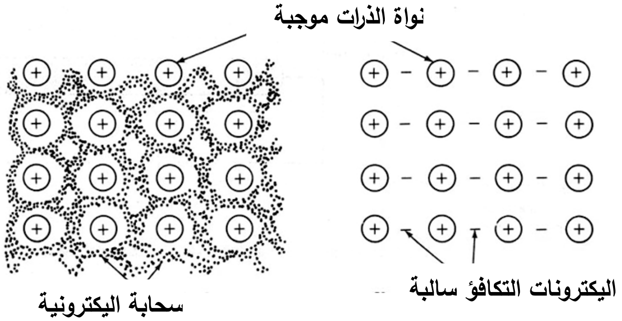
الفصل العاشر

المواد الكهربية والالكترونية

يهتم هذا الفصل بتوضيح مظاهر توصيلية المعادن وأشباه الموصلات، وتأثير فرق الجهد ودرجة الحرارة عليهما، مع الإشارة إلى بعض تطبيقات المواد الكهربائية والالكترونية في النواحي الصناعية.

ومن المعروف أن الذرات تتركب من إلكترونات سالبة تدور في مدرات حول نواة موجبة، وأن المدار الأخير في الذرة وعدد إليكترونات به هو الأهم من الأجزاء الأخرى من حيت التوصيلية، وذلك بسبب تجادب الإليكترونات القريبة من النواة إلى النواة، بحيث تصبح هذه الإليكترونات تابعة ومنجذبة إلى مركز الذرة ولاتتأثر بالعوامل الخارجية.

إن تواجد عدد قليل من الإليكترونات في المدار الأخير للمعادن يعمل على تكوين رابطة معدنية بين ذراتها بسبب تكوين سحابة اليكترونية، كما أن هذه الإليكترونات تكون في حالة توازن كهربي مع نواة الذرات الموجب الشحنة، كما بالشكل (10-1).



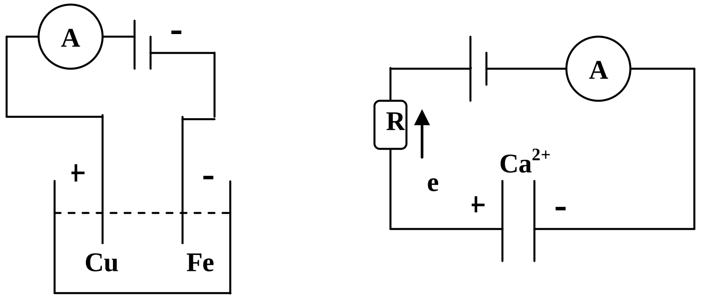
شكل(10 - 1) تعادل الشحنات في الرابطة المعدنية.

10 - 1 توصيلة المواد:

إن توصيلية المواد تعتمد على نوع المادة وعلى نوع الرابطة بين ذراتها وهناك ثلاثة حقائق مهمة حول توصيل المواد وهي الإستقطاب وسريان التيار وتوليد المجال المغناطيسي:

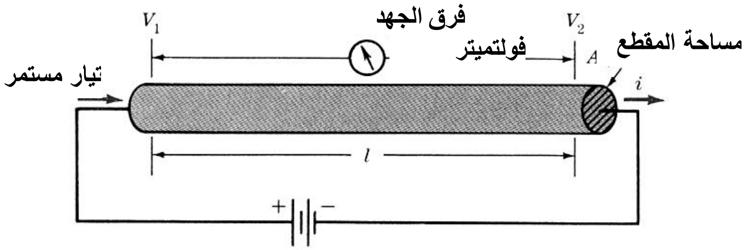
1. عند وضع مادة في مجال كهربي (سلك معدني مثلاً في دائرة كهربية) فإن الإليكترونات والأيونات أو أي منهما تتعرض لقوة تسمى قوة كولوم وبذلك تتحرك الإليكترونات والأيونات في إتجاه القوة، جالبة معها الشحنة الكهربية فإذا كانت الشحنة ليس لها القدرة على الإنتقال في الوسط لمسافات كبيرة نتيجة لمقاومة المادة (High resistivity) كما في الروابط الأيونية عند درجة الحرارة العادية فإن الشحنة تتجمع على نهاية طرفي المادة ويقال أن المادة أو المعدن في حالة إستقطاب كما هو بالشكل (10- 2).

وعند قطع التيار الكهربي فإن الأيونات ترجع الى حالة الإتزان السابقة . والجدير بالذكر أن شحنة الاليكترون تساوى 1.6×10^{-19} كولوم . والكولوم لكل ثانية يساوي الأمبير أي أن سريان إليكترون لكل ثانية يساوى 1 أمبير . كما أن شحنة الأيونات تساوي عدد إليكترونات التكافؤ × 1.6×10^{-19} كولوم.



شكل(10- 2) الإستقطاب في الخلايا الكهربية السائلة وفي المعادن.

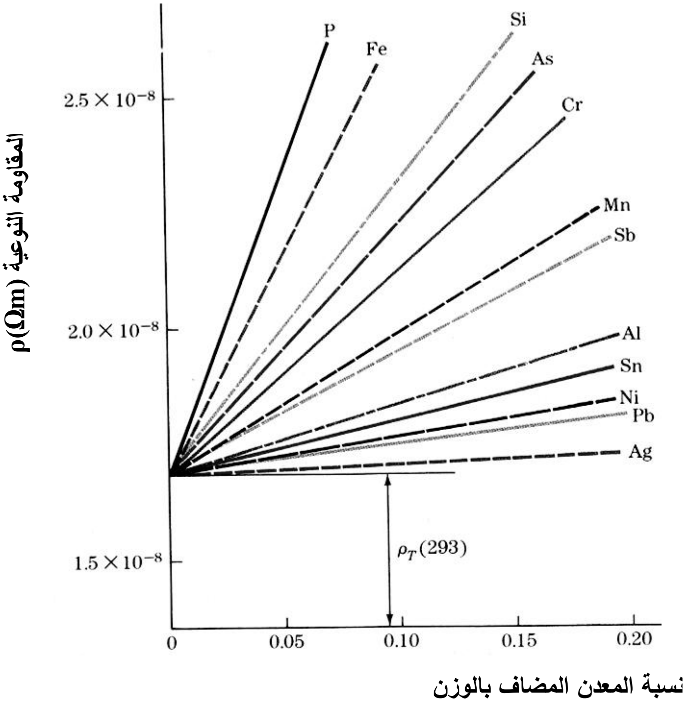
2. عندما تكون الإليكترونات والأيونات حرة الحركة لمسافات كبيرة نتيجة لوجود فرق جهد بين طرفي المادة فإنها توصف بالمادة الموصلة للكهرباء، ومن الأمثلة على ذلك النحاس والفضة والذهب والألومنيوم وغيرها. وسبب توصيلها هو وجود العديد من الإليكترونات الحرة التى يمكن لها الحركة تحت تأثير مجال كهربي أي فرق جهد كما بالشكل(10 - 3).



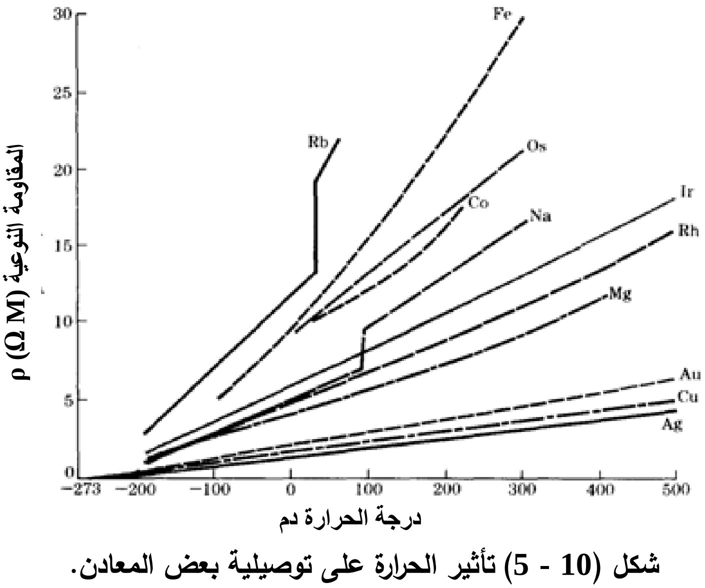
شكل (10−3) توصيل التيار الكهربي في موصل.

ومن الملاحظ أن إضافة مواد إلى المعادن لتكوين السبائك يقلل من توصيلتها الكهربية، ولذلك يفضل في بعض الأحيان الإستعانة بالتشغيل على البارد لتقسية المعدن عن إضافة مواد أخرى عندما تكون التوصيلة لها الأولوية في خواص المادة أو المعدن والشكل(10-4) يوضح تأثير إضافة المعادن المختلفة على المقاومة النوعية للنحاس.

بالمثل فإن زيادة درجة حرارة الموصل يزيد من إهتزاز نوات الذرات الموجب مما يعمل على إنبعات موجات حرارية، وهذا يقلل من توصيليته، أي تزيد الحرارة في المقاومه مع زيادة درجة الحرارة كما بالشكل(10- 5).



الشكل(10-4) تأثير إضافة المعادن المختلفة على المقاومة النوعية للنحاس.



شكل (10 - 5) تأثير الحرارة على توصيلية بعض المعادن.

3. الخاصية الثالثة لحركة الإليكترونات يمكن توضيحها كما يأتي : عندما يكون هناك تيار كهربي يمر في سلك دائري فإن مجالاً مغناطيسياً يمكن إنتاجه بفعل وجود محور في وسط الملف ، وبمقارنة ذلك بوضعية الذرة فإن دوران الإليكترونات حول النوات في مداراتها أو دورنها حول نفسها على محورها (spin) ينتج عن هذه الحركة مجال مغناطيسي ضعيف جداً وتكون الذرة في حالة إتزان . وعندما يكون هناك مجال مغنطيسي خارجي فإن إليكترونات الذرات تترتب على إتجاهين متوازيين وهو ما يسمى بالاستقطاب المغناطيسي.

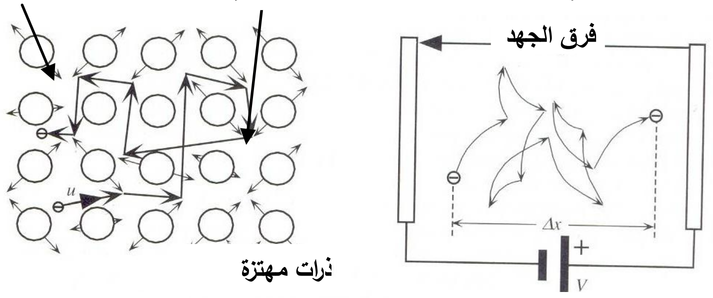
2-10 الأساسيات الفيزيائية لتوصيلية المواد:

تحتوي ذرة النحاس على إليكترون واحد في المدار المساعد (Sub Shell) وهذا الإليكترون ضعيف الإرتباط بالذرة، مما يجعله متحركاً وغير مرتبط بذرة معينة، ومن تجمع الإليكترونات الحرة تتكون السحابة الإليكترونية التي تعبر عن الرابطة المعدنية، كما أن للنحاس نواة موجبة تتمركز في الأوضاع المألوفة لتوزيع الذرات في البلورة السطحية (FCC).

والجدير بالذكر أن المعادن الموصلة للكهرباء مثل النحاس والألومنيوم ليست مثالية في تركيبها، فهي تحتوي على عيوب بلورية كثيرة مثل الفجوات والإلتواءات بالإضافة إلى الشوائب، وجميعها تعمل على تشتيت اليكترونات التوصيل. وتنتقل الإليكترونات في حركة عشوائية في جميع الإتجاهات وتصطدم مع الذرات المهتزة بلا فقد للطاقة.

وحينما يؤثر على المعدن جهد خارجي، تنتظم الإليكترونات في إتجاه معين حسب نوع قطبي الجهد، وبذلك يتم سريان التيار في الموصل. والشكل(10 - 6)

يوضح حركة الإليكترونات في حالتي عدم وجود جهد ووجود جهد مؤثر على الموصل.



(10 - 6) تأثير الحرارة على توصيلية بعض المعادن.

إن المقاومة الكهربية ونوعية الرابطة بين الذرات كما هو مبين في الجدول(1-10) توضح أن المواد ذات الرابطة المعدنية متبلرة أو سائلة مثل الزئبق لها مقاومة كهربية ما بين $10^{-7}-10^{-8}$ أوم . متر والتي تعتبر مواد موصلة . في حين أن المواد ذات الرابطة التساهمية لها مقاومة كهربية ما بين 0.6 أوم. متر للجرمانيوم و2300 أوم.متر للسليكون النقي، وتسمى بأشباه المواصلات.

أما المجموعة الثالثة والتي لها مقاومة كبيرة من $10^{12}-10^{17}$ أوم متر فهي مواد عازلة أو شبه عازلة حسب موقعها في تدريج المقاومة الكهربية . وأخيراً المواد ذات الرابطة الأيونية ولها مقاومة كبيرة وتدخل ضمن مجموعة العوازل.

وتقاس المقاومة النوعية للمادة (Resistivity) من قانون أوم وبمعرفة أبعاد المادة كما في المعادلة(1-10) .

$$I = \frac{V}{R} \qquad \therefore R = \frac{V}{I}$$

$$\therefore \quad \rho = \frac{RA}{L} \qquad (1-10)$$

عندما يكون :

I = شدة التيار بالامبير. V = فرق الجهد بالفولت.

R = المقاومة الكهربية للمادة بالاوم. A = مساحة مقطع الموصل.

L = طول الموصل. ρ = المقاومة النوعية .

جدول(10-1) المقاومة النوعية لبعض المعادن والسبائك عند 20 درجة مئوية.

المعدن	ρ_o (Ωm)	n	المعدن	ρ_o (Ωm)	n
المجموعة الأولى: المعادن الموصلة					
الآلومنيوم (Al)	$2.6x10^{8}$		الأنتيمون (Sb)	$3.8x10^{8}$	
الذهب (Au)	$2.3x10^{8}$		الفضة (Ag)	$1.5x10^{8}$	1.11
النحاس (Cu)	$1.7x10^{8}$	1.15	القصدير (Sn)	$11x10^{8}$	1.11
البلاتين (Pt)	$9.8x10^{8}$	0.94	التنجستون (W)	$5.0x10^{8}$	1.2
الإنديوم (In)	$7.8x10^{8}$		الحديد (Fe)	$8.4x10^{8}$	1.8
تنتاليوم (Ta)	$12x10^{8}$	0.93	النيكل (Ni)	$6.9x10^{8}$	1.72
المجموعة الثانية: أشباه الموصلات					
السليكون(Si)	2300		الجرمانيوم(Ge)	0.60	
المجموعة الثالثة: العوازل					
الزجاج	10^{-10} 10^{14}		الخشب	10^{-8} 10^{11}	
الميكا	10^{-11} 10^{15}		الكبريت	10^{15}	

10-3 تأثير درجة الحرارة على التوصيلية الكهربية للمواد:

إن المقاومة النوعية لمعظم المعادن النقية (وهي معكوس التوصيلية) تتناسب طرديا مع إرتفاع درجات الحرارة وبذلك تتبع معادلات خطية كما بالشكل (10-7)، في حين أن المقاومة النوعية للسبائك مثل النيكل والكروم تكون قليلة التأثر بالحرارة، وبذلك يمكن حساب المقاومة النوعية للمعادن النقية عند أي درجة حرارة من المعادلة (10-2).

$$\rho = \rho_o \left[\frac{T}{T_o}\right]^n \qquad (2-10)$$

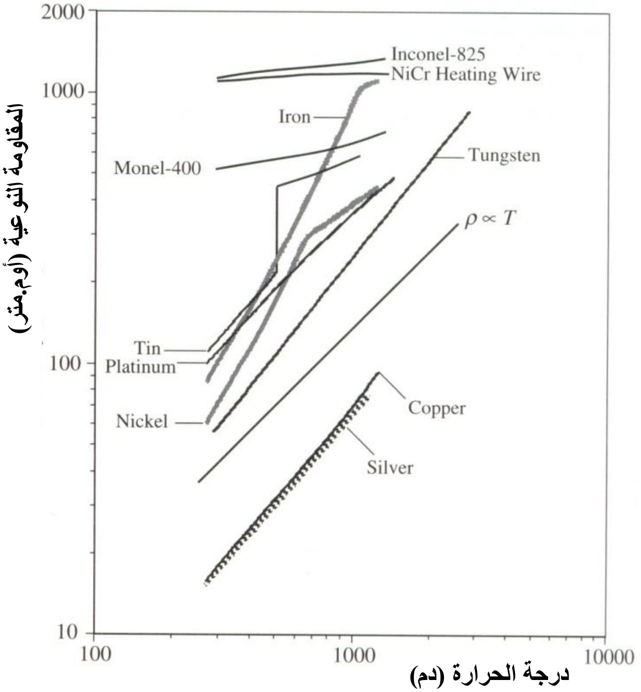
حيث أن:

ρ_o: المقاومة النوعية عند درجة حرارة قياسية أو مرجعية (T_0).

ρ : المقاومة النوعية عند درجة الحرارة المطلوبة (T).

n : معامل ثابت للمعدن، كما بالجدول (10-1).

ويلاحظ أن المعادلة (10-2) تكون صحيحة فقط عند درجات حرارة تتجاوز 100 درجة كلفن لمعظم المعادن، وذلك أن إنخفاض درجات الحرارة عن هذا الحد يقلل من إهتزاز النواة ويزيد كثيراً من التوصيلية، أي أن المقاومة النوعية لن تكون خطية في التغير مع درجات الحرارة، وهذا يدخل في نطاق التوصيلية الفائقة للمواد.



شكل(10-7) تغير المقاومة النوعية مع درجات الحرارة لبعض المعادن.

10-4 المقاومة النوعية للسبائك:

حيث أن السبائك أو المعادن غير النقية تتكون من أكثر من عنصر فإن توصيليتها تعتمد على نسبة العناصر المضافة أو الشوائب بها ولا تعتمد على درجة الحرارة، ومعنى ذلك أنه كلما زادت المواد المضافة إزدادت المقاومة النوعية للسبيكة مع عدم التأثر بدرجات الحرارة، فمثلا بإضافة 20% كروم إلى 20 % نيكل نتحصل على سبيكة (Nichrome) التي تستعمل كثيراً في صناعة ملفات التسخين للمياه وأفران الطهي والمدافي الكهربائية، وهذه السبيكة لها مقاومة نوعية تتجاوز ستة عشرة ضعفاً من مقاومة النيكل كما هو موضح بالجدول(10-2). وتختلف المقاومة النوعية من حيث إضافة عنصر وحيد له طور واحد أو عدة عناصر لها أطوار متعددة.

جدول(10-2) المقاومة النوعية للنيكل والكروم عند 20 دم.

المعدن	المقاومة النوعية (nΩm)
النيكل	69
الكروم	129
سبيكة: 20 كروم 80 % نيكل	1120

10-4-1 سبائك ذات طور واحد:

من الملاحظ أن الكثير من السبائك الثنائية مثل النيكل والذهب، والذهب والنحاس، والفضة والذهب، والنحاس الرصاص، جميعها معادن ثقيلة لها سبائك ناتجة عن الإحلال بسبب الذوبان الكامل لكلا العنصرين في بعضهما البعض مما يكون طوراً واحداً في معظم الاحيان. هذه السبائك لها مقاومة نوعية منخفضة عند طرفي التركيز ونهاية عظمى قريبة من المنتصف، أي عندما يكون التركيز للعنصرين في مدى 50% لكل منهما.

ولقد تمكن العالم نوردهايم من إيجاد صيغة تحدد قيمة المقاومة النوعية للسبائك الثنائية من طور واحد كما في المعادلة (10-3).

$$\rho=\rho_m + CX(1-X) \qquad (3-10)$$

حيث أن:

C : ثابت نوردهايم للمعدن، كما بالجدول (10-3).

X: تركيز المعدن المضاف.

ρ: المقاومة النوعية للسبيكة.

ρ_m: المقاومة النوعية للمعدن السائد في السبيكة.

جدول(3-10) معامل نوردهايم (c) لبعض سبائك النحاس.

المعدن المضاف إلى النحاس	معامل نوردهايم $(n\Omega m)$	أقصى قيمة للذوبانية % عند 25 دم
ذهب	5500	100
منجنيز	2900	24
نيكل	1250	100
قصدير	2900	0.6
خارصين	300	30

ويلاحظ أن التركيزات الصغيرة للعناصر المضافة أو الشائبة يكون تأثيرها ضعيفا علي القيمة (1-X) وبذلك تختصر المعادلة (3-10)، إلى المعادلة (4-10).

$$\rho = \rho_m + CX \qquad (4-10)$$

مثال:

تستعمل السبيكة التي تحتوي على 90 % بالوزن ذهب و 10% نحاس في صناعة القواطع الكهربائية ذات الجهد المنخفض وذلك أن لهذه السبيكة خواص ميكانيكية أفضل من الذهب، ومقاومة للتآكل أفضل من النحاس. أوجد المقاومة النوعية للسبيكة عندما تكون المقاومة النوعية للذهب تساوي 22.8 نانوأوم .متر.

الحل

يمكن ايجاد المقاومة النوعية للسبيكة من المعادلة (3-10) وذلك بعد تحويل النسب المئوية بالوزن إلى الوزن الجزئ كما يأتي:

$$X = \frac{M_{Au}\, w}{(1-w)M_{Cu} + w\, M_{Au}} \qquad (5-10)$$

عندما يكون:

M: الوزن الذري.

w: النسبة المئوية بالوزن للمعدن المضاف.

$$\rho_{Au} = 22.8\ n\Omega m \quad \text{and} \quad C = 450\, n\Omega m$$

$$X = \frac{197\ x\ 0.1}{(1-0.1)\,63.55 + (0.1x197)} = 0.256 = 25.6\% \qquad (5-10)$$

$$\rho = \rho_{Au} + CX(1-X)$$
$$= 22.8 + 450\,x\ 0.256\ (1-0.256) = 108.5\ n\Omega m$$

وهذه القيمة مساوية تقريبا للقيمة المتحصل عليها معمليا.

10-4-2 المقاومة النوعية للسبائك متعددة الأطوار:

يمكن التعبير عن المقاومة النوعية للسبائك التي تحتوي على أكثر من طور واحد بما يسمى بالمقاومة الفعالة (Effective Resistevity) والتي تعتمد على المقاومة النوعية والحجم الجزئ لكل طور في السبيكة (Volume fraction).

فمثلا عند وجود سبيكة تتكون من طورين (α) و (β) موزعة عشوائيا كما بالشكل (10-8) ، فإنه يمكن بعدة طرق حسابية أو مجهرية تحديد النسبة المئوية لحجم كل من الطورين في السبيكة، أو ما يعرف بالحجم الجزئي لكل منهما، وبذلك يمكن حساب المقاومة الفعالة من المعادلة (10-5).

$$\rho_{eff} = \chi_\alpha\, \rho_\alpha + \chi_\beta\, \rho_\beta \qquad (5-10)$$

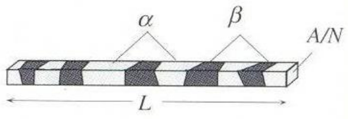
$$\chi_\alpha = \frac{V_\alpha}{V} \qquad (6-10)$$

حيث أن:

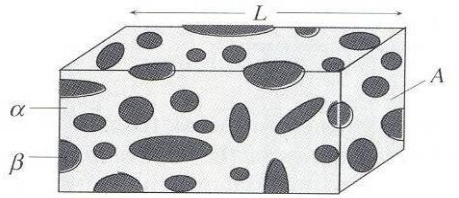
ρ_{eff}: المقاومة الفعالة للسبيكة ρ_{α}: المقاومة النوعية للطور.

v_{α}: حجم الطور في السبيكة V : الحجم الكلي للسبيكة

χ_{α}: الحجم الجزئي للطور



قطاع طولي في السبيكة



السبيكة المتكونة من طورين

شكل(10 –8) سبيكة بها طورين من المعادن.

10–5 التوصيلية الحرارية للمواد:

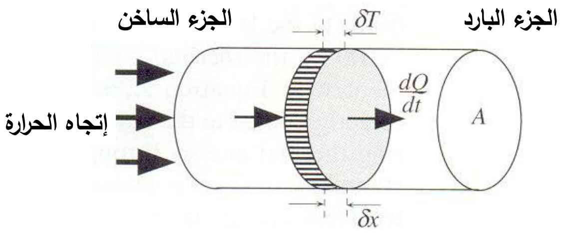
الخبرة الطويلة في مجالات المعادن تؤكد أن المعادن ذات التوصيلية الجيدة للكهرباء هي موصلة جيدة للحرارة كذلك، وهذا يعني أن إليكترونات التوصيل للكهرباء لها دور في توصيل الحرارة، وهو صحيح لمعظم المعادن، وليس كذلك للمواد غير المعدنية الأخرى.

فلقد وجد أن التوصيل الحراري للمعادن عند درجة الحرارة العادية والأعلى منها يكون بحركة إليكترونات حزمة التوصيل، في حين أن نقل الحرارة عند درجات الحرارة المنخفضة يكون بإهتزاز ذرات المعدن.

فعندما يتم تسخين أحد طرفي معدن موصل يزداد مدى إهتزاز الذرات في هذا الطرف وتزداد كذلك طاقة الحركة للإليكترونات، فتكتسب الذرات جزأً من الطاقة وتنقل الفائض منه إلى الإليكترونات المجاورة في إتجاه الطرف البارد، وهكذا يستمر نقل الحرارة عن طريق الإليكترونات من الجزء الساخن إلى الجزء البارد من المعدن.

10-5-1 أساسيات التوصيل الحراري للمواد:

يمكن تعريف التوصيل الحراري على أنه مقدرة المادة على نقل الحرارة، وتتركز أساسياته على وجود قطب معدني موصل تم تسخين أحد طرفيه كما بالشكل(10-9) ، فتتنقل الحرارة مع الزمن من الطرف الساخن إلى الطرف البارد.



شكل(10-9) إنتقال الحرارة في موصل.

ويمكن تمثيل إنتقال الحرارة في المعدن بقانون فورير للتوصيل الحراري:

$$Q' = \frac{dQ}{dt} \qquad (8-10)$$

$$Q' = -Ak\frac{\delta T}{\delta x} \qquad (9-10)$$

حيث أن:

Q' :معدل إنتقال الحرارة. A :مساحة مقطع الموصل.

$\frac{\delta T}{\delta x}$: معدل التغير في درجة الحرارة مع المسافة.

$\frac{dQ}{dt}$:معدل إنتقال الحرارة مع الزمن.

k :معامل التوصيلية الحرارية للمعدن.

وتوضح الإشارة السالبة في المعادلة (10-9) أن درجة الحرارة تنتقل من الطرف الساخن وفي تناقص، أي في إتجاه من الجزء الساخن إلى البارد. وعند مقارنة هذه المعادلة بقانون أوم الذي تم إشتقاقه بدلالة التوصيلية الكهربية كما في المعادلة(10-10) نجد أن المعادلتين متماثلتان، وذلك أن القوة الدافعة في حالة التوصيل الكهربي هو فرق الجهد في حين أن القوة الدافعة في حالة التوصيل الحراري هو فرق درجات الحرارة.

$$I = A\sigma \frac{dv}{dx} \qquad (10-10)$$

حيث أن:

I: شدة التيار σ : التوصيلية الكهربية.

dv: فرق الجهد بين المعدنين. dx: المسافة.

A: مساحة مقطع الموصل.

ولقد أذى هذا التماثل إلى إستنباط قانون لورنس الذي يربط بين التوصيل الحراري والكهربي كما في المعادلة (10−11).

$$\frac{k}{\sigma T} = C_1 \qquad (11-10)$$

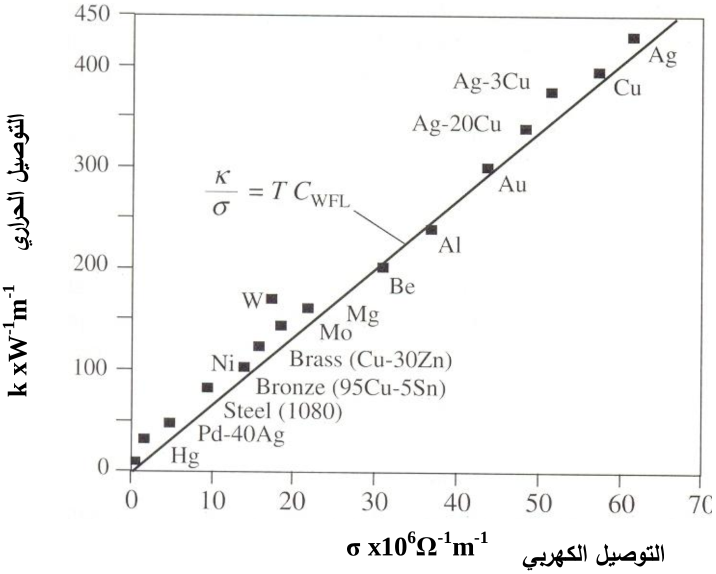
$$C_1 = 2.45 \times 10^{-8} \ W\Omega K^{-2}$$

حيث أن:

k :معامل التوصيل الحراري للمادة.   σ :التوصيلية الكهربية للمادة.

T :درجة الحرارة. C_l :معامل لورنس للتوصيل.

ولقد وجد معمليا أن معظم المعادن والسبائك تخضع إلى هذا القانون عند درجات حرارة أكبر من درجة الحرارة العادية، والشكل(10−10) يبين العلاقة بين التوصيل الكهربي والحراري لبعض المعادن والسبائك.



شكل(10 −10) العلاقة بين التوصيلية الحرارية والكهربية لبعض المعادن والسبائك الصناعية.

10-5-2 الإزدواج الحراري :

لاحظ العالم سيباك (Thomas Seebeck) في سنة 1821 م أن قضيب النحاس عند تسخين أحد طرفيه إلى 100 دم وتبريد الطرف الآخر إلى الصفر المئوي، فإن فرقا في الجهد يتكون بين طرفي المعدن. ولقد تم تفسير هذه الظاهرة بأن الإليكترونات في المنطقة الساخنة تزداد حركتها مما يجعلها تتجه ناحية المنطقة الباردة، حيث تتراكم وتعمل على تكوين قطب موجب، في حين أن المنطقة الساخنة تمثل القطب السالب، وبذلك يحدث سريان للإليكترونات بين القطبين حتى يتكون مجال كهربي بينهما فتتوقف حركة الإليكترونات بين طرفي الموصل.

وحيث أن مقدار التغير في فرق الجهد بالنسبة للتغير في درجات الحرارة يكون ثابتا للمعدن الواحد كما في المعادلة (10-12) ، فإن هذه القيمة قد تم التعبير عنها بمعامل الجهد الكهروحراري أو معامل سيباك (Seebeck Coefficient)، ولقد تم قياس وجدولة هذه القيمة للعديد من المعادن الصناعية.

$$S=\frac{dv}{dT} \qquad (12-10)$$

حيث أن:

S: معامل التوصيل الكهروحراري. dv: مقدار التغير في الجهد.

dT: مقدار التغير في درجة الحرارة.

ويمكن إيجاد فرق الجهد من تكامل المعادلة (10-13).

$$\Delta V=\int_{T_0}^{T} S\ dT \qquad (13-10)$$

حيث أن:

T_o: درجة الحرارة القياسية أو المرجعية.

T: درجة الحرارة الفعلية.

ΔV: فرق الجهد بين طرفي موصل.

وحيث أن فرق الجهد بين طرفي موصل عند وجود إختلاف في درجة الحرارة يكون منعدما أي يقارب قيمة الصفر بالنسبة للمعدن الواحد، فإن المعادلة السابقة لن تكون مجدية لقياس فرق الجهد في هذه الحالة، في حين أن وجود معدنين مترابطان عند درجة حرارة معينة يمكن أن يصدر عنهما فرق جهد محدد، وهذه الظاهرة لها أهمية عند قياس درجات الحرارة عن طريق قياس فرق الجهد للإزدواج الحراري. وتستخدم المعادلة (10-13) لإستنباط قياس فرق الجهد للإزدواج الحراري.

$$V_{AB} = \Delta (V_A - V_B) \qquad (14-10)$$

$$V_{AB} = \int_{T_0}^{T} (S_A - S_B)\, dT \qquad (15-10)$$

$$\because \; S_{AB} = S_A - S_B \qquad (16-10)$$

$$\therefore \; V_{AB} = \int_{T_0}^{T} (S_{AB})\, dT \qquad (17-10)$$

ولقد تم الإتفاق على أن تكون درجة الحرارة القياسية هي درجة الصفر المئوي، وأن يكون جهد المعدن أو القوة الدافعة الكهربية للمعدن مقاسة بالنسبة لمعدن البلاتينيوم، والجدول (10-4) يبين القوة الدافعة الكهربية لبعض المعادن والإزدواجات الحرارية.

جدول (10−4) القوة الدافعة الكهربية لبعض المعادن والإزدواجات الحرارية عند 100 دم.

المعدن	ق.د.ك (mV)	الإزدواج	ق.د.ك (mV)
النحاس	0.76	إزدواج ألوميل (Alumel)	-1.29
الذهب	0.78	ازدواج كروميل (Chromel-P)	2.81
المولیبدنیوم	1.45	إزدواج كونستنتان (Constantan)	-3.51
النيكل	-1.48	إزدواج النحاس	0.76
البلاديوم	-0.57	إزدواج الحديد	1.89
البلاتين	0.0	إزدواج البلاتين والراديوم (90% Pt-10%Rd)	0.643
الفضة	0.74		
التنجستون	1.12		

إن معامل سيباك الكهروحراري (S) يعتمد على جهد حزمة التكافؤ للمعدن ودرجة الحرارة كما في المعادلة (10−18) ، وبتعويضها في المعادلة (10−17) ، يمكن الحصول على معادلة الإزدواج الحراري، التي تهتم بقياس فرق الجهد عند درجات الحرارة العالية ومنها يمكن قياس درجات الحرارة . والشكل (10−11) يبين العلاقة بين القوة الدافعة الكهربية ودرجة الحرارة لبعض الإزدواجات الحرارية المستعملة صناعيا.

$$S=\frac{\pi^2 k^2 T}{2\,e\,E_{fo}} \qquad (18-10)$$

$$V_{AB} = a\,\Delta T + b\,(\Delta T)^2 \qquad (19-10)$$

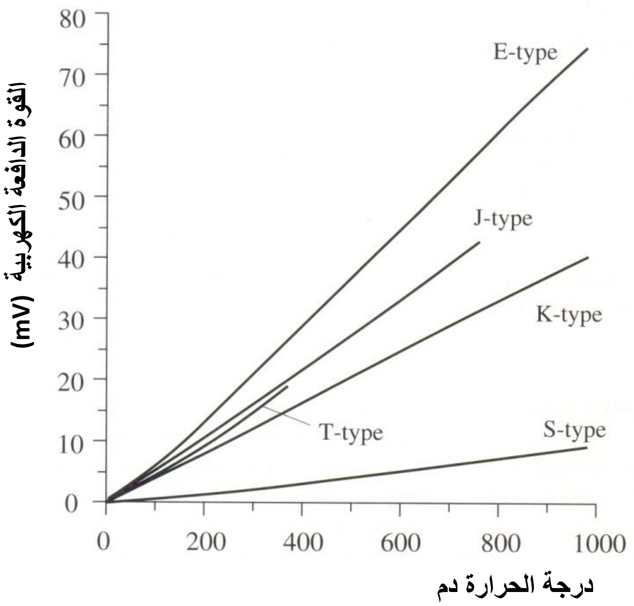
$$\Delta T = T - T_0$$

حيث أن:

T:درجة حرارة المعدن الفعلية (k). k:معامل بولتزمان.

E_{fo}: جهد حزمة التكافؤ للمعدن (eV). V_{AB} :جهد الإزدواج الحراري.

a & b :توابت الإزدواج الحراري.



شكل(10–11) تغير القوة الدافعة الكهربية مع درجة الحرارة لبعض الازدواجات الحرارية.

10–5–3 التوصيلة الفائقة (Super - conductivity):

في سنة 1911 قام العالم أونس (Onnes) بتبريد عمود من الزئبق إلى درجة حرارة ما دون 4.2 درجة كلفن، ولقد لاحظ أن التوصيلية الكهربية للزئبق قد إزدادت كثيراً أي إلى مالانهاية، وان سريان التيار الكهربي مستمرا بلا جهد كهربي ولا مقاومة،

وهذه الظاهرة أطلق عليها التوصيلية الفائقة (Super Coductivity). ومنذ ذلك الحين وجد العديد من المعادن والسبائك التي تتبع هذه الظاهرة مثل القصدير والرصاص والنايوبيوم والإنديوم وغيرها. بالمقابل فإن النحاس ذو التوصيلية العالية عند درجة الحرارة العادية لا يكتسب هذه الخاصية عند درجات الحرارة المنخفضة.

وهناك تفسيراً لهذه الظاهرة يقول: أن إنخفاض درجات حرارة المادة يخفض من تـردد إهتزاز (Vibration - Frequency) أيونات المادة الموجبة وبذلك تقل مقاومة الأيون الموجب للاليكترونات (أي يقل جذب الايون للاليكترونات) وبذلك تقل المقاومة مع إنخفاض درجة الحرارة لتصل الصفر عند درجة قريبة من الصفر المطلق .

وكما هو ملاحظ من الشكل(10−5) وجود درجة حرارة حرجة عندها يكون التغير كبيراً في المقاومة وهذه وضحها (J . Barden) باستعمال مفهوم تكون أزواج الإليكترونات (pair formation) أي أن تحت الدرجة الحرجة تلتقى الإليكترونات المتحركة في إتجاهات تبعا لتكوين زوج من كل منها وبذلك يقل انتشار الإليكترونات وتقل مقاومتها الكهربية أو تنعدم.

وما يؤاخذ على التوصيلية الفائقة للمعادن النقية (التوصيلية من النوع الأول) أنها تفقد عند إرتفاع درجات الحرارة عن الدرجة الحرجة كما بالشكل(10−5) ، وكذلك عند إزدياد التيار الكهربائي أو عند وجود مجال مغناطيسي كبير. كما أن الغاز الوحيد الذي يمكن استعماله للتبريد في مثل هذه الظروف الباردة جدا هو غاز الهليوم، وهذه العوائق جميعها حالت دون إستغلال هذه الظاهرة في النواحي الصناعية حتى الستينات من القرن الماضي، عند إكتشاف التوصيلية الفائقة للسبائك والتي تعرف بالنوع الثاني.

تتلخص توصيلية النوع التاني في وجود سبائك لها القدرة على التوصيل الفائق رغم وجود مجال مغناطيسي كبير، ومن هذه السبائك تلك التي تحتوي على القصدير والنايوبيوم (Nb_3Sn) والنايوبيوم والتيتانيوم (Nb-Ti)، وهذه السبائك تستعمل كثيراً في

صناعة المغناطيسيات المستخدمة في أجهزة التصوير المقطعي بالرنين المغناطيسي (MRA) ومعجلات الإليكترونات في مراكز الأبحاث وغيرها.

ورغم أن العديد من المركبات تم إكتشافها خلال الثمانينات والتسعينات من القرن الماضي مثل (La-Ba-Cu-O) و (Y-Ba-Cu-O) وبعض أكاسيد المعادن الأخرى، إلا أن إستعمالها لا يزال محدوداً بسبب ثبات التوصلية عند درجة حرارة منخفضة من 90 إلى 130 درجة كلفن، وهذه تتطلب تجهيزات خاصة تزيد من تكاليفها الباهضة.

تطبيقات التوصيلية الفائقة :

رغم مرور قرابة قرن على اكتشاف هذه الظاهرة إلا أنها لم تستغل إستغلالاً جيداً وذلك بسبب صعوبة العمل ولاحتياج إلى تجهيزات خاصة عند هذه الدرجات الحرارية المنخفضة جداً. إلا أنه يوجد العديد من المحاولات والدراسات لاستغلالها في المجالات الآتية :-

1- صناعة كوابل كهربية لها توصيلية فائقة وذلك لاستغلالها للمسافات البعيدة حيث يكون هناك فاقد كبير في الجهد عند إستعمال الخطوط العادية .

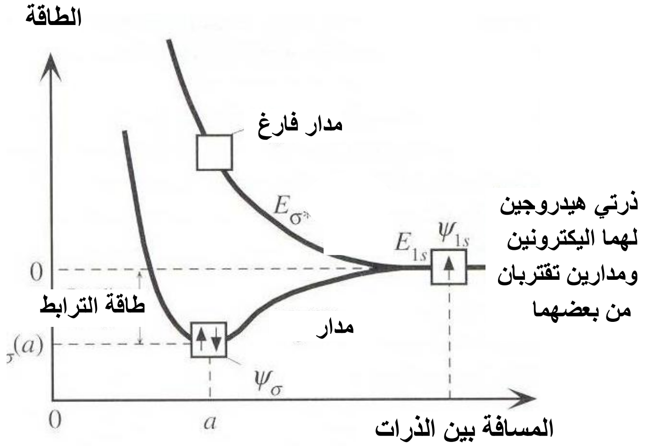
2- صناعة أجهزة حاسوب لها سرعة تقدر بـ 5 إلى 10 أضعاف أسرع من الأجهزة الحالية والتى تستعمل أشباه الموصلات .

3- صناعة أجهزة قياس شدة المغناطيسية، وخاصة الضعيفة منها.

4- صناعة مغناطيسيات ذات مجالات عالية .

6-10 نظرية حزم الطاقة للمواد الصلبة:

تعتمد نظرية حزم الطاقة لتفسير إنتقال الشحنات على نتائج نظرية الكم (Quantum Physics)، ويمكن تبسيط الأمر بملاحظة ماذا يحدث عند إقتراب ذرتي هيدروجين من بعضهما لتكوين جزئ يحتوي على رابطة تساهمية، في هذه الحالة يتكون مداران، إحداهما يحتوي على اليكترونين ويمثل طاقة الترابط والآخر لا توجد اليكترونات به (فارغ) كما هو مبين بالشكل(10-12).

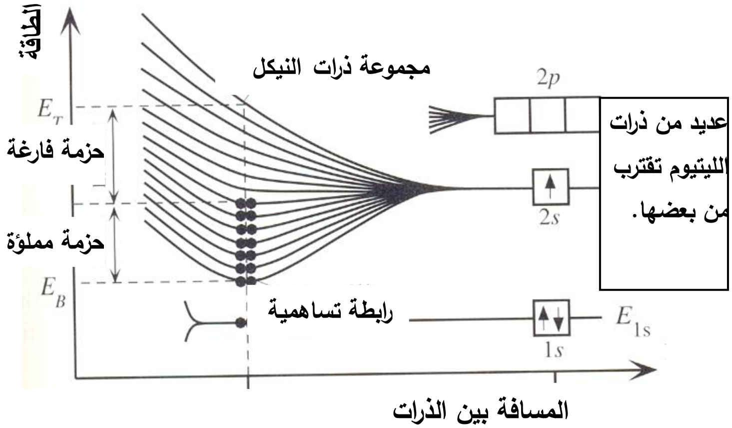


شكل(10-12) التغير في طاقة الإليكترونات عند ترابط ذرتي هيدروجين برابطة تساهمية لتكوين جزئ الهيدروجين.

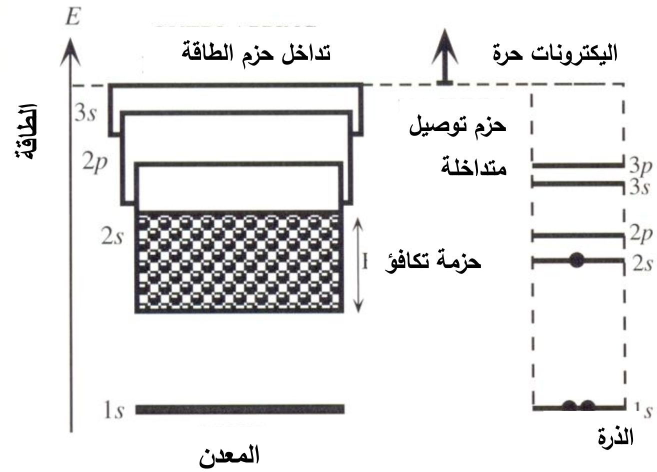
إن طاقة الوضع الناتجة عن تجاذب الإليكترونين إلى النواة (الموجبة) لكلا الذرتين أكبر من طاقة الوضع الناتجة عن تنافر الإليكترونات في مدارها وتنافر نواتي الذرتين وبذلك يكون جزئ الهيدروجين مستقرا.

وبالمثل يمكن رسم وتمثيل مستويات الطاقة في المعادن، فالشكل(10-13) يعبر عن إقتراب وترابط عدد كبير(N) من ذرات الليثيوم، بحيث يتكون من ترابطها

مدارات كثيرة (N) بتوزيع تقليدي لعدد الإليكترونات في كل مدار، ففي المدار الأول (1s) يوجد اليكترونين لا علاقة لهم بالتكافؤ أو التوصيل، في حين أن المدار الثاني (2s) يكون مملؤ جزئياً بحيث يمثل جزء منه حزمة التكافؤ والجزء الآخر حزمة التوصيل. وتتوالى المدارات اللاحقة متداخلة مع المدارات التي سبقتها بحيث تدخل في حزمة التوصيل كما بالشكل(10-14).

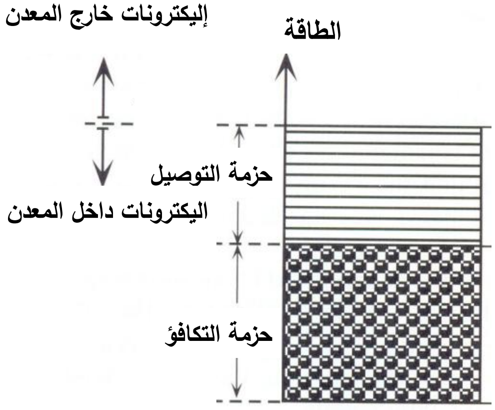


شكل(10-13) مدارات التكافؤ والتوصيل عند ترابط ذرات الليثيوم.



شكل(10-14) تداخل حزم طاقة التكافؤ للمدارات في الموصلات.

وبذلك يمكن جمع مستويات الطاقة للتوصيل في مستوى واحد تسمى حزمة التوصيل التي تتكون من اليكترونات حرة يمكن لها الإنتقال، والیكترونات مدار التكافؤ تتجمع في مستوي أقرب إلى النواة وتسمى بحزمة التكافؤ، كما بالشكل(10-15). ويسمى جهد حزمة التكافؤ بمستوى فيرمي (Fermi Level) وجهد حزمة التوصيل بجهد دالة الشغل (Work Function) وتنتقل الإليكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل كلما زادت درجة الحرارة أو الجهد وبذلك تزداد توصيلية المعدن.



شكل(10-15) تجمع المدارات إلى حزمتي طاقة التكافؤ والتوصيل في المعادن الموصلة للكهرباء.

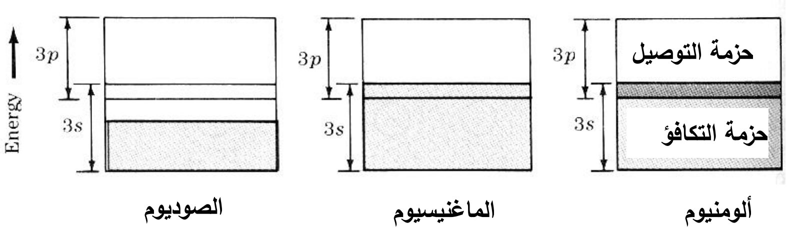
10-6-1 توصيلية المواد على ضوء نظرية حزم الطاقة:

لقد ثم تفسير التوصيلية الكهربية على أساس أنماط حزم الطاقة لكل عنصر والشكل(10-16) يبين اليكترونات التكافؤ ومستويات حزم الطاقة لذرات الصوديوم والماغنيسيوم والآلومنيوم. ويلاحظ أن اليكترونات المدار الأخير تكون لها حزم طاقة

لانها حرة الحركة في حين أن اليكترونات المدارات الداخلية تكون مرتبطة ومنجدبة إلى النواه ولن يكون لها حزم طاقة.

وتتكون حزمة الطاقة في الموصلات من حزمة التكافؤ وحزمة التوصيل ففي حالة الفراغ الجزئ لحزمة التكافؤ والفراغ الكلي لحزمة التوصيل يكون المعدن موصلا جيدا للكهربا كما في الصوديوم والنحاس والفضة والذهب.

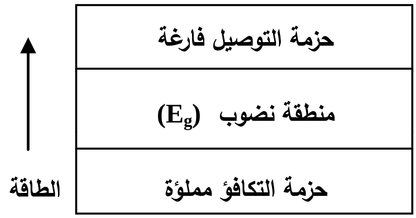
أما في الحالة الثانية فان حزمة التكافؤ تكون مملوءة وحزمة التوصيل تكون فارغة جزئيا مع عدم وجود مزج بين المستويين كما في معدن الماغنيسيوم، وكذلك في الحالة الأخيرة عندما يكون هناك مزج بين مستويات التكافؤ والتوصيل كما في معدن الألومنيوم، فان وجود الفراغ الجزئ في مستوى التكافؤ يساعد على التوصيل الجيد للكهرباء.



شكل(10–16) حزم الطاقة لبعض المعادن الموصلة

أما في حالة المواد العازلة، فإن اليكترونات المدار الأخير تكون مرتبطة مع نواة ذراتها بروابط أيونية أو تساهمية ولن تكون حرة لنقل الكهرباء إلا إذا تم التأثير عليها بطاقة خارجية كبيرة.

وتتكون أنماط حزم الطاقة للمواد العازلة من حزمة التكافؤ مملوءة وحزمة التوصيل فارغة وهذا يجعل هناك مسافة أو فراغ بينهما يحول دون إنتقال الإليكترونات أي إنتقال الكهرباء ويحتاج الاليكترون إلى ما يقارب 7 إليكترون فولت للإنتقال من مستوي التكافؤ إلى مستوى التوصيل كما بالشكل (10–17) .

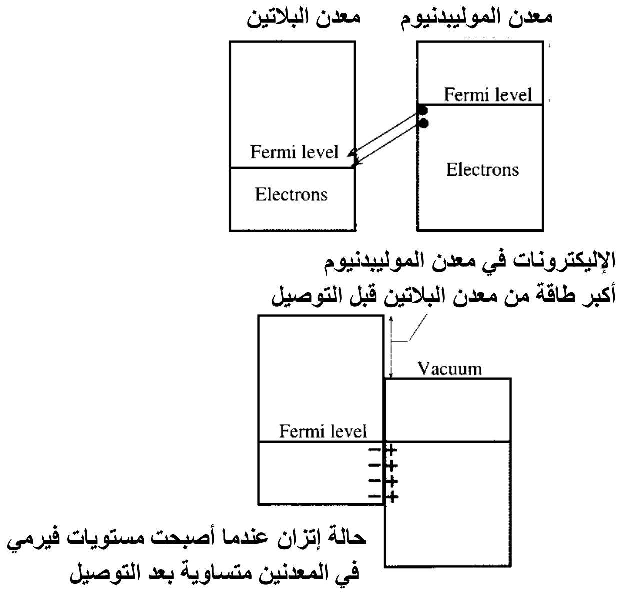


شكل(10−17) حزمة التكافؤ وحزمة التوصيل ومنطقة النضوب لأشباه الموصلات والعوازل.

10−6−2 جهد الإرتباط (Contact potential):

عند إرتباط معدنين مختلفان في دالة الشغل (Work Function) كما بالشكل (10−18) ، أي أن جهد المعدن (B) أكبر من جهد المعدن (A)، وهذا يعني أن مستوى طاقة التكافؤ للمعدن(A) أكبر من مستوى طاقة التكافؤ للمعدن (B)، فإن جهد المعدنين يكون في حالة عدم إستقرار، مما يؤدي إلى سريان الإليكترونات من المعدن (A) إلى المعدن (B) حتى يتساوى الجهد في المعدنين ويصبح المعدنان في حالة إتزان أو إستقرار من ناحية فرق الجهد.

وينتج عن إنتقال الإليكترونات تواجد شحنات موجبة على المعدن (A) وشحنات سالبة على المعدن (B).



شكل(10 –18) سريان التيار الكهربي بين معدنين مختلفين في الجهد.

ويمكن حساب جهد الارتباط للمعدنين من المعادلة (10-20).

$$V_{AB} = \frac{(\phi_B - \phi_A)}{e} \qquad (20-10)$$

حيث أن:

$\phi_B \ \phi_A$: فرق الجهد بالفولت للمعدنين A,B.

V_{AB}: دالة الشغل (طاقة) للمعدنين (Work function).

e : اليكترونات.

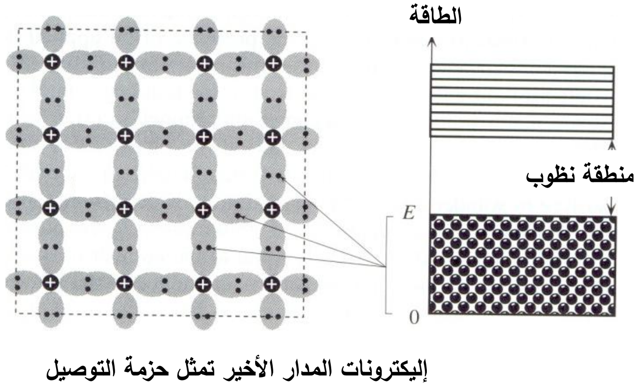
ومن القانون الثاني للديناميكا الحرارية (Second low of thermodynamics) فإن جهد الإرتباط بين معدنين في حالة إتزان يكون مساويا للصفر(أي لا يوجد شغل بين المعدنين , وأن جهد الإتزان ليس قادرا على إنتاج تيار في الدائرة الخارجية).

ويعتبر جهد الإرتباط ذو أهمية كبيرة لتوضيح الكثير من التطبيقات الإليكترونية مثل سريان التيار الكهربي بين وصلتي (P-N) في أشباه الموصلات، والخلايا الشمسية والترنزيستورات وكذلك الإزدواجات الحرارية.

10–7 أشباه الموصلات:

10–7–1 التكوين البلوري لأشباه الموصلات:

في غالبية تطبيقات تكنولوجيا أشباه الموصلات يتم العمل على مادة سيليكونية أحادية البلورة، تترتب ذراتها في نسق خالى من الانخلاعات. فالسيليكون ذو النظام البلورى الأحادى يتكون من بلورتين كل منهما مكعبة سطحية **(f .c .c)** متداخلتين بشكل يبدو كأن أحدأهمها مزاحة محوريا بربع المسافة القطرية عن الأخرى. وبسبب هذا النمط من الإنتظام تكون لكل ذرة أربع ذرات قريبة التجاور تتشارك بالكترونات في خدمة التكافؤ ومترابطة برابطة تساهمية كما بالشكل(10–19).



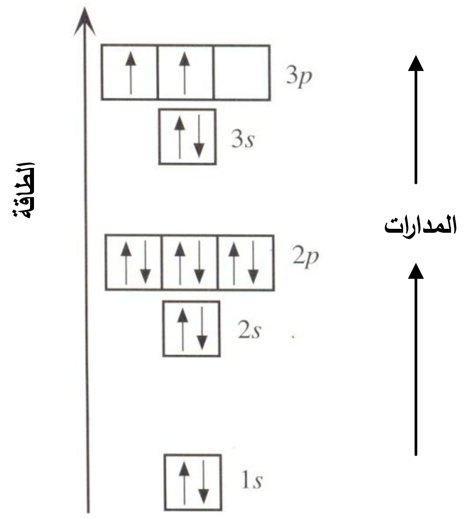
شكل (10 - 19) الروابط التساهمية في بلورات السليكون.

ولفهم كيفية إرتباط ذرة السليكون مع أربعة ذرات أخرى مجاورة يتطلب الأمر معرفة مكونات مدارات ذرة السليكون وكيفية تكوين الروابط التساهمية بها.

تحتوي ذرة السليكون على 14 إليكترون تتوزع على مدارات (1s,2s,2p,3s,3p) كما بالشكل(10−20). ولقد تم تمثيل المدارات بمربعات تحتوي كل منها على اليكترونين كحد أقصى (حسب نظرية الكم) ويدور الإليكترونان في إتجاهين متعاكسين.

وحيث أن المدارين الأول والتاني مشبعان بالإليكترونات وقريبان من النواة الموجبة، فإنهما ليس لهما القدرة على تكوين روابط مع ذرات أخرى، أما المدار (3p) والمدار الفرعي (3s) فإنهما بعيدان عن النواة، كما يلاحظ أن المدار (3s) مشبع يحتوي على اليكترونين، والمدار (3p) غير مشبع ويحتوي على اليكترون فقط، وفي الواقع أن المدارين (3s) و (3p) قريبان جداً من بعضهما مما يؤدي إلى إمتزاج حركة الإليكترونات في كلاهما عند وجود 4 ذرات سليكون خارجية مترابطة معها، مما يعمل على تكوين أربعة مداراة جديدة يحتوي كل منها على اليكترون واحد (أي مدارات نصف مملؤة) مما يساعد على إرتباطها مع أربعة ذرات سليكون مجاورة، وهذا يعمل على تكوين البلورة الرباعية المعروفة لذرات السليكون (Tetrahedral).

هذا المفهوم المبني على نظرية الكم يفسر كذلك ترابط السليكون مع الهيدروجين لتكوين هيدريد السليكون (SiH_4) المستعمل كثيراً في صناعة أشباه الموصلات، بل أن النظرية صالحة لتفسير تفاعل الكربون مع الهيروجين لتكوين المواد الهيدروكربونية المختلفة.



شكل(10–20) توزيع الإليكترونات على مدارات ذرة السليكون.

10–7–2 حركة الإليكترونات والفجوات:

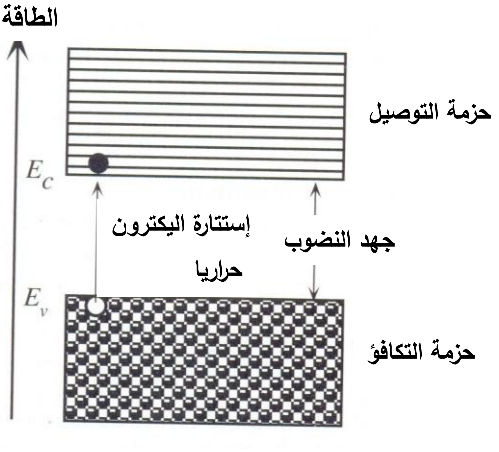
توجد طريقتان لتكوين روابط بين ذرتي السيليكون المتجاورتين واللتان تحتوي كل منهما على 4 مدارات تكافؤ، وذلك إما بإضافة الإليكترونات السالبة إلى بعضها والموجبة إلى بعضها (وهذا يعتمد على إتجاه حركة الإليكترونات في مداراتها) أو بدمج السالبة منها مع الموجبة لتكوين روابط تنائية.

وبسبب التداخل بين مدارات عدد كبير من ذرات السليكون، تتكون حزم طاقة كثيرة متلاصقة، وهذه بدورها تنقسم إلى مجموعتين رئيسيتين وهما حزمة التكافؤ (Valance band)، وتكون مملؤة بالإليكترونات، وحزمة التوصيل (Conduction band) التي يوجد بها نقص في الإليكترونات عند درجة الحرارة العادية وتكون فارغة من الإليكترونات عند درجة الصفر المطلق، وبين الحزمتين منطقة نضوب (Depletion region) ، وهو فراغ صغير بين الحزمتين لا تستقر فيه الإليكترونات في

حالة أشباه الموصلات، وتحتاج الإليكترونات إلى طاقة لتتجاوزه عند إنتقالها من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل. والشكل(10−17) و (10−19) يوضحان توزيع الإليكترونات على حزم الطاقة في بلورة السليكون.

وحيث أن هذه الروابط والحزم تتواجد في جميع الذرات عند ترابطها مع بعضها البعض، فإن إليكتروناتها تتوزع على جميع البلورات والذرات المكونة لها، مما يجعل إليكترونات حزمة التوصيل غير محددة لذرة معينة بل تمثل اليكترونات حرة يمكن لها الحركة عند التأثير عليها خارجيا.

وبزيادة درجة حرارة المعدن أو التأثير عليه بفرق جهد بين طرفيه، بحيث تكون الطاقة الخارجية أكبر من طاقة منطقة النضوب، فإن ذراته يزيد إهتزازها والإليكترونات تمتص الطاقة وتزداد حركتها، وبذلك تكتسب طاقة تؤهلها للإنتقال من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل كما بالشكل(10−21).

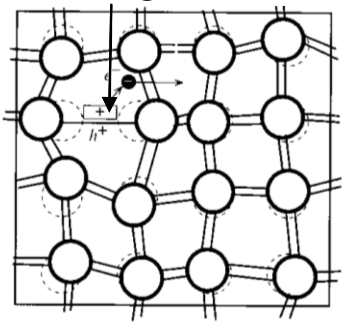


شكل(10−21) إنتقال إليكترون من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل مرورا بمنطقة النضوب وتكوين شحنة موجبة في حزمة التكافؤ.

وقد ينتج عن الطاقة الخارجية إهتزاز كبير يؤدي إلى كسر الروابط التساهمية وتحرير إليكترونات لها القدرة على الإنتقال إلى حزمة التوصيل كما بالشكل(10-22)، وبذلك تكون هذه الإليكترونات السالبة وسيلة لنقل الكهرباء بين أجزاء المعدن.

كما أن الإليكترون المنتقل من حزمة التكافؤ يترك وراءه فراغ (Hole)، وهذا الفراغ له القدرة على الإنتقال بإحلال الإليكترونات محله كشحنة موجبة، وبذلك يتحقق لأشباه الموصلات نقل الإليكترونات السالبة والشحنات الموجبة في آن واحد.

ويلاحظ أن عدد الإليكترونات الحرة في حزمة التوصيل مساويا لعدد الشحنات الموجبة في حزمة التكافؤ في حالة أشباه الموصلات النقية وتختلف عن بعضها في حالة أشباه الموصلات المشوبة.



شكل(10-22) تكسر أحد الوابط التساهمية وإنطلاق إليكترون حر.

10-7-3 أشباه الموصلات النقية (Intrinsic Semicoductors):

إن إستثارة إليكترون من حزمة التكافؤ(**Ev**) من (المدار الأخير في الذرة) إلى حزمة التوصيل (**Conduction band**) E_C وذلك بأن الاليكترون قد أستبعد وجوده ضمن روابط الذرات التساهمية للبلورة وأصبح حراً قابلاً للتوصيل الكهربي في حزمة التوصيل كما بالشكل(10-21). ويقال لمكان هذا الاليكترون الفجوة (**Hole**). وتمثل

الفجوة شحنة موجبة في حين أن الاليكترون يمثل الشحنة السالبة. وبذلك يكون هناك فرق للجهد بين مستوى حزمة طاقة التكافؤ (E_v) ومستوى حزمة طاقة التوصيل E_C ويسمى هذا الفرق بطاقة الحزمة الممنوعة E_g (gap Energy).

$$E_g = E_C - E_v$$

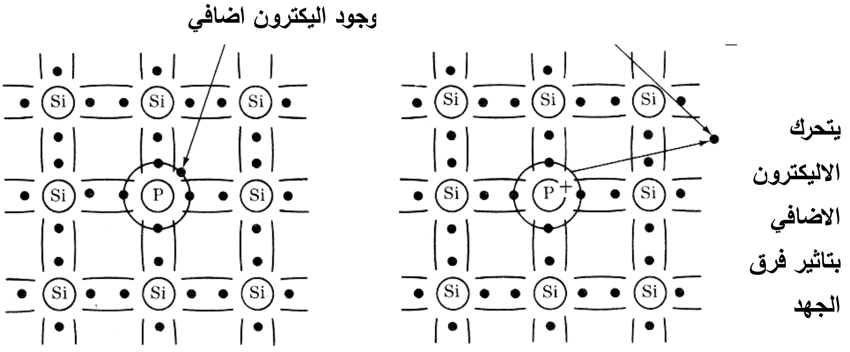
وتعتبر E_g قيمة ثابتة عن درجة حرارة معينة يمكن بها تحديد نوعية الموصل.

فمثلاً : طاقة الحزمة الممنوعة لكل من الماس 5.3 والسيليكون 1.06 و الجرمانيوم 0.67 إليكترون فولت عند درجة حرارة 20 درجة مئوية وتوضح هذه الارقام أن الماس عازل والسيليكون والجرمانيوم أشباه موصلات.

وبذلك نرى أن الإليكترونات والفجوات تساهم جميعاً في التوصيل في حالة أشباه الموصلات كما أن توصيلية السيليكون النقي (Intrinsic Semiconductor) تقل كثيراً أو تنعدم عند درجات الحرارة المنخفضة .

10-7-4 أشباه الموصلات المشوبة (Extrinsic semiconductor):

تتكون أشباه الموصلات المشوبة بإضافة شوائب لاشباه موصلات نقية (Intrinsic) فيؤدى ذلك إلى ازدياد عدد الالكترونات (الحرة) أو أزدياد عدد الفجوات عدة مرات مضاعفة . وتسمى الشوائب التى تولد زيادة في الإليكترونات التوصيل بالشوائب (المانحة) Donor impurities وهذه تؤدى إلى تكوين أشباه موصلات مشوبة من النوع السالب (n.type).



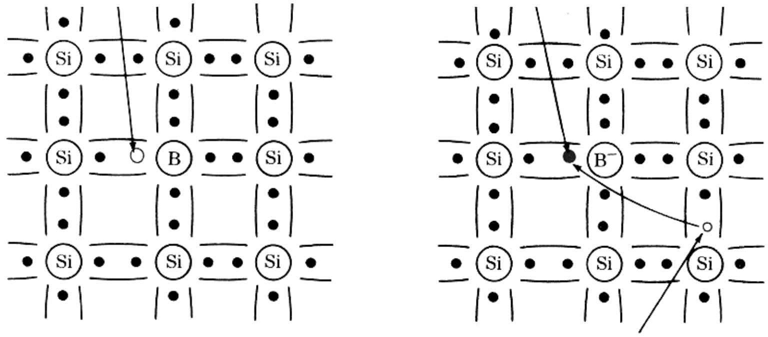
شكل(10–23) حركة الإليكترونات في شبه موصل مشوب بالفوسفور.

فالسيليكون النقي ، على سبيل المثال ذو الاربعة إليكترونات تكافؤ يضاف له الفسفور الذي له خمسة إليكترونات تكافؤ ينتج عن ذلك شبه موصل من النوع السالب. وتكون توصيلية شبه موصل مشوب أكثر بكثير من التوصيلة لشبه موصل نقي.

أما الذرات المشوبة الموجبة (p - type) فهي تلك التي يحدث لها نقص في إلكترونات مستوى التكافؤ، فكأنها بذلك تساهم بتجهيز فجوة إلى عملية التوصيل وتسمى هذه الشوائب بالشوائب الآخذة (Acceptors).

فمثلاً تمتلك ذرة عنصر البورون ثلاثة إليكترونات تكافؤ لذلك يعتبر من الشوائب الأخذة عند تطعيمها في السليكون. وتكسب الشوائب الآخذة إلكتروناً وتصبح سالبة التأين.

والشكل(10–23) و(10–24) يوضحان حركة الإليكترونات في كل من أشباه الموصلات المشوبة الموجبة والسالبة.



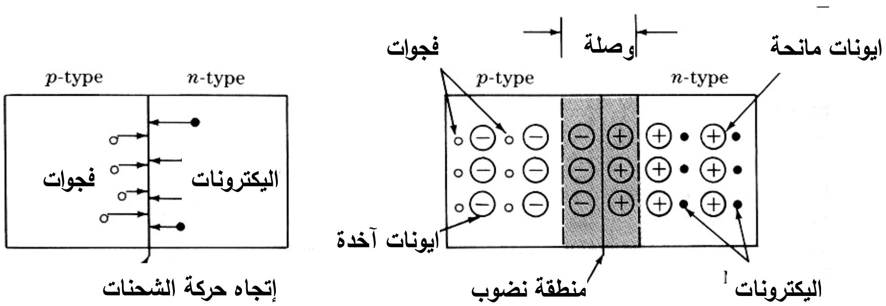
شكل (10–24) حركة الإليكترونات والفجوات في بلورة سليكون مشوبة بالبرون.

10–7–5 الإنحياز الأمامي والعكسي:

يمكن تطعيم مادة شبه موصلة ليكون أحد أجزائها من نوع n والجزء الآخر من نوع p وعندما يكون الجزأن متجاورين تكون المنطقة بينهما وصلة p-n وتعتبر هذه الوصلة من الأهمية بمكان في مجال تطبيقات أشباه الموصلات مثل الخلايا الشمسية وصناعة الترانزيستورات ومقوم Rectifiers التيار والدوائر المتكاملة (Integrated circuits) وغيرها .

عند ملتقى نوعي أشباه المواصلات p-n تنتقل الشحنات بالانشار في إتجاهين، أي الإليكترونات من n إلى p والفجوات من p إلى n إلى أن يصل الحال إلى إستقرار وتعادل في الشحنات (بدون فرق جهد خارجي) كما ينتج عن ذلك وجود منطقة نضوب (depletion region) عند الوصلة سمكها 0.5 ميكرون (5000 أنجستروم). وسميت كذلك لان المنطقة قد أستنزفت منها الشحنة كما بالشكل (12 - 9). ورغم وجود فرق جهد بين طرفي أشباه الموصلات من نوع n ، p إلا أنه لن

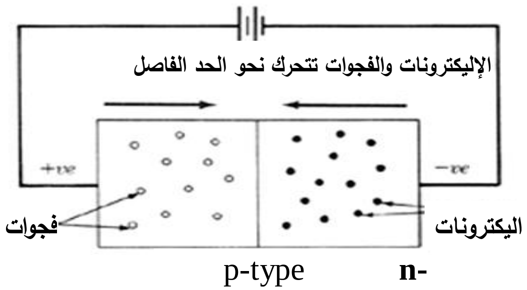
يكون هناك سرياناً مستمراً للتيار الكهربي بعد عملية التعادل أو الاستقرار السابقة، ويحتاج إنتقال الشحنات إلى مصدر جهد خارجي ليتغلب على عقبة الوصلة بين الطرفين.



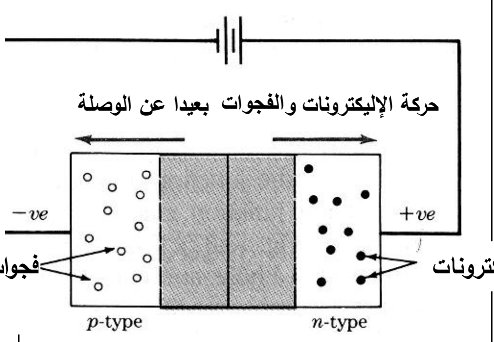
شكل(10−25) حركة الإليكترونات والفجوات نحو الحد الفاصل في بدون جهد خارجي.

عند تسليط فرق جهد خارجي بحيث يكون توصيل القطب الموجب بمنطقة p والقطب السالب في منطقة n والذى يسمى بالانحياز الامامي (forward bias) يعمل الجهد الموجب على معادلة المنطقة السالبة (الفجوات) كما يقوم بين الجهد السالب بمعادلة المنطقة الموجبة (الإليكترونات) وتسمى هذه العملية بإنتقال الفجوات والاليكترونات في إتجاهين متعاكسين .

وبهذا يقل الجهد مسبباً سريان تيار كهربي عند الملتقى وخلال الدائرة الخارجية، وعند عكس توصيل قطبي فرق الجهد وهو مايسمى بالانحياز العكسي **(reverse bias)** يزداد فرق الجهد على الجانبين مما يمنع سريان التيار .



الإنحياز الأمامي



الإنحياز العكسي

شكل(10−26) حركة الإليكترونات والفجوات في الانحياز العكسيي والأمامي.

أسئلة الفصل العاشر

1. وضح العلاقة بين التوصيلية والمقاومة الكهربية.
2. أوجد المقاومة (R) لقطب من النحاس قطره 5.25 مم وطوله 1.5 م إذا كانت التوصيلية النوعية للنحاس تساوي $5.8x10^{7}$ (أوم .م)$^{-1}$.
3. ما تأثير الشوائب والمعادن المضافة على توصلية النحاس.
4. تأثير إرتفاع درجة الحرارة على توصلية النحاس والألومنيوم.
5. سلك معدني قطره 0.25 سم تم تصميمه لنقل تيار قدره 30 أمبير. أوجد التوصيلية الكهربية للمعدن إذا كانت كمية الطاقة المستهلكة تساوي 0.03 وات لكل سم، وماهي كثافة التيار للموصل.
6. سلك نحاسي تم تصميمه لنقل تيار كهربي قدره 10 أمبير، على أن لا يتجاوز الفقد في الجهد 0.4 فولت لكل متر، فإذا كانت توصيلية المعدن (σ) تساوي $5.8x10^{7}$ (أوم .م)$^{-1}$. أوجد الحد الأدنى لقطر السلك.
7. بإستعمال نظرية حزم الطاقة، وضح ما سبب المقاومة النوعية العالية للمواد العازلة.
8. أذكر أهم العناصر المستعملة في صناعة أشباه الموصلة النقية مع بيان أهم خواصها.
9. وضح ما تأثير الحرارة على توصيلية أشباه الموصلات النقية.
10. إذا كانت المقاومة النوعية لمعدن السليكون النقي تساوي $2.3x10^{3}$ أوم.م عند درجة حرارة 300 درجة كلفن. أوجد توصيلية المعدن عند درجة حرارة 250 دم.
11. عرف أشباه الموصلات من نوع n ومن نوع P مع ذكر العناصر المستعملة في كل منها.

12. بين بالرسم حركة الإليكترونات والفجوات في دائرة الإنحياز الأمامي والعكسي.

13. وضح مع الرسم حركة الإليكترونات والفجوات في وصلة (Pn):

أ. عندما لا يوجد تأثير بفرق جهد خارجي.

ب. عند توصيل الجهد بإنحياز أمامي أو إنحياز عكسي.

المراجع الأجنبية:

1- K. G. Budinski " Engineering Materials Properties and Selection" 5th ede., Prentice Hall of India (1996)
2- R. A. Flinn and P. K. Trojan "Engineering Materials and their Applications" 3rd ed., Houghton Mifflin (1986).
3- R. Chang " General Chemistry" 4th ed., McGraw Hill (1990).
4- S. Avner " Introduction to Physical Metallurgy" 2nd ed., McGraw Hill (1987).
5- G. E. Dieter "Mechanical Metallurgy" Mc Graw Hill (1986).
6- F. Smith " Foundation of Materials Science and Engineering" 2nd ed., McGraw Hill (1993).
7- D. Askeland " The Science and Engineering of Materials" PWS Engineering (1985).
8- B. D. Cullity " Elements of X-ray diffraction" 2nd ed., Addison-Wesley (1978).
9- T. H. Courtney " Mechanical behavior of materials" McGraw Hill (1989).
10- ASM Metals Handbook Properties and Selection, Vol.1,2,3 and 4, 9th ed., Metal Park Ohio (1978).
11- T. V. Rajan et.al., "Heat Treatment Principles and Techniques" Prentic Hall of India (1992).
12- B. Harris " Engineering Composite Materials" Institute of Metals (London) (1986).
13- N. Derucher " Materials For Civil And High Way Engineers" 4th ed., Prentice Hall Inc.(1998).
14- W. H. Hatfield and J. H. Miller, High Temperature Superconducting Materials, Marcel Dekker (1988).

View publication stats